

钢包底吹气体多相流及夹杂物去除数值模拟研究

刘恺，谷少鹏，李涛*，王宏婧

华北理工大学冶金与能源学院，唐山 063210

Numerical simulation of multi-phase flow and inclusion removal in ladle with bottom-blowing argon

Kai Liu, ShaoPeng Gu, Tao Li*, HongJing Wang

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

1. 前言

钢铁是我国的基础产业，也是我国的支柱产业，随着钢铁业由高速增长阶段转向高质量发展阶段，对钢产品质量要求越来越高。夹杂物是影响高质量钢产品的重要因素，有效控制和去除钢中的夹杂物，降低夹杂物对钢产品性能的不良影响，对生产高品质洁净钢具有重要意义。钢包作为炉外精炼的主要设备，底吹氩气是其重要的精炼功能之一，不仅可使钢液成分和温度均匀，还能促进钢中夹杂物上浮与去除。底吹氩气去除钢中夹杂物是一个复杂的多相流过程，许多冶金工作者利用数值模拟方法对其进行了广泛研究，分析了夹杂物去除的机理和效果。Kwon 等^[1]采用计算流体力学的软件研究了氩气气泡大小、夹杂物尺寸等因素对夹杂物分布和去除的规律；王立涛等^[2]分析了透气砖孔径及吹氩流量等对夹杂物去除效果；卢叶等^[3]采用 FLUENT 中基于 Euler-Lagrange 方法的离散相模型模拟钢包底吹氩气过程，将钢液视为连续相，夹杂物视为离散相，研究了底吹参数对钢液流场和夹杂物去除效果的影响。虽然研究人员针对夹杂物去除行为进行了大量的数值模拟工作，但大部分工作中对夹杂物去除过程的处理与实际过程仍有一定差距，大多数仅考虑了夹杂物随着钢液流动上浮至渣层这一去除方式，而对夹杂物被气泡捕获去除这一方式考虑较少。本论文以某钢厂钢包为原型，根据多相流模型的特点，采用 Euler-Lagrange 方法建立了夹杂物去除的三维数学模型，自主开发 UDF 程序，实现了夹杂物被气泡捕捉去除过程的模拟。探究了钢包底吹氩气对不同区域夹杂物的去除效果及夹杂物尺寸对去除率的影响规律，为提高夹杂物去除率，优化钢产品质量提供理论指导。

2. 数值模型

2.1. 几何模型与网格划分

图 1 是使用 ANSYS SpaceClaim 建立的钢包三维模型，钢包底面直径为 1462 mm，顶面直径为 1500 mm，钢包高度为 1720 mm，钢液深度为 1400 mm，渣层厚度为 100 mm。两吹气孔直径为 16 mm，两吹气孔与底面圆心连线夹角为 180°，距底面圆心距离为 390 mm。

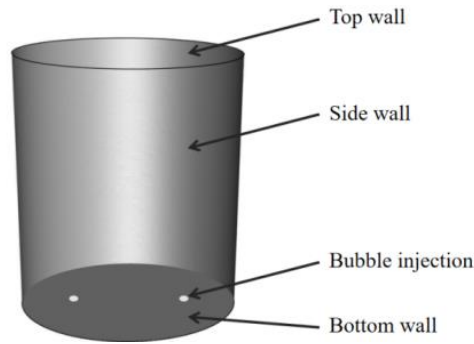


图 1 钢包物理模型及边界条件

Fig. 1 Physical model and boundary conditions of ladle

2.2. 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，对吹气孔附近的网格进行了细化，以提高计算模型的仿真精度。整个钢包模型绘制完毕后由近 50 万个网格组成。

2.3. 边界条件设置

该钢包由吹气孔、出口及壁面组成，钢包中所有的固体壁面均设为壁面边界条件，为了观察钢包顶面的流场，将钢包顶部设置为无剪切力的自由面。表 1 列出了当前模型中 DPM 所使用的边界条件。

表 1 数值模型中边界条件

Table 1 Boundary conditions used in numerical setup

边界	边界条件	DPM 边界条件
吹气孔	速度进口	反射
钢包顶面	剪切力为 0 的壁面边界	逃逸
钢包侧壁	固定壁面	反射
钢包底面	固定壁面	反射

2.4. 夹杂物去除模型

应用 UDF 程序模拟了气泡和夹杂物在钢包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)，对钢包内每个气泡与夹杂物距离进行判定。当夹杂物与气泡在一段时间内距离达到一定范围内，则认为气泡与夹杂物之间形成了稳定的附着，夹杂物被气泡捕捉并去除。

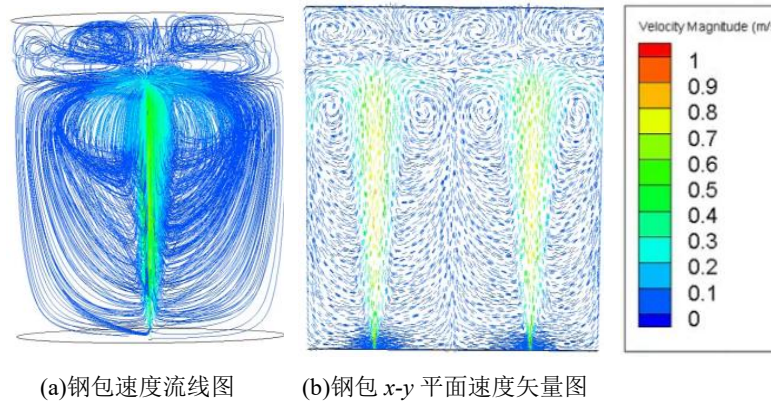
2.5. 夹杂物分布的统计方法

将钢包沿横向与纵向共划分为 15 个区域，分析钢包内夹杂物的运动及去除情况。钢包在纵向上分为 5 个部分，分别为 0-280、280-560、560-840、840-1120、1120-1400 mm；在横向上分为 3 个部分，分别为 0-250、250-500、500-750 mm。采用 UDF 程序统计各个区域每秒夹杂物数量，进而计算夹杂物去除率。

3. 结果与分析

3.1. 钢包流场状态

图 2 (a)为 120L/min 钢包速度流线图，可以发现钢包底吹氩流场的基本特征：气体由底部的吹气孔吹出，在钢包中产生气泡，气泡受到钢液的浮力而上浮。气泡在上浮过程中带动钢液流动，使处于吹气孔正上方的液体形成强烈的向上流股。当气液两相区形成的上升流到达渣面后，气体溢出渣面，而到达液面的钢水将被驱动流向四周，然后再向下流动，最后又被中心上升流抽引，从而形成一种循环流动。由图 2(b)钢包 x-y 平面速度矢量图可以看出，钢包上半区流场速度明显高于下部。因此，对于钢包上半区混匀效果以及夹杂物去除效率会远高于下半区。



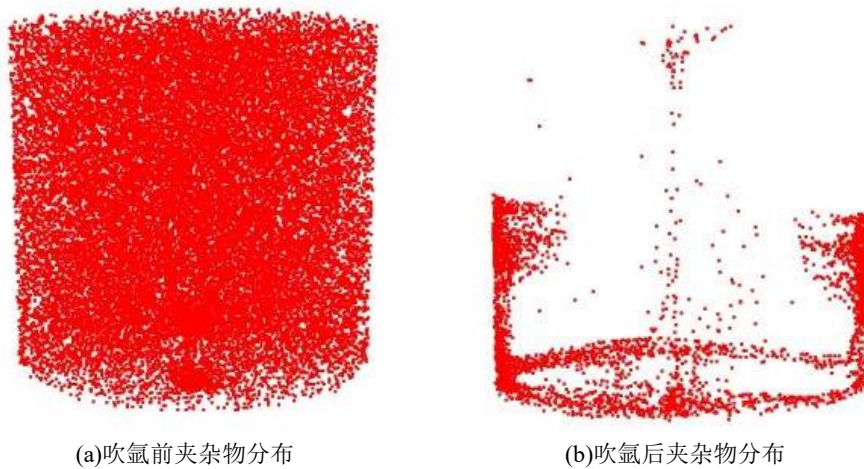
(a)钢包速度流线图 (b)钢包 x-y 平面速度矢量图

图 2 钢包内部速度分布

Fig. 2 The distribution of velocity in the ladle

3.2. 各区域夹杂物去除率

由上流场状态可知，钢包内各区域夹杂物去除率将有较大差异。因此，在 120L/min 吹氩流量下吹氩 5min 后，截取了钢包吹氩前后夹杂物分布图，如图 3 所示。利用 UDF 程序统计了每个区域的夹杂物数量，钢包内各区域夹杂物去除率如图 4 所示。分别对同高度、同半径下夹杂物去除率分析，结果正如预期，处于钢包下半区气柱两侧流场速度缓慢，不利于钢包混匀以及夹杂物的去除。因此，由图 4 可知，下半区气柱两侧区域夹杂物去除效果远不如气柱所在区域以及钢包上半区，且下半区壁面附近夹杂物去除率更低。



(a)吹氩前夹杂物分布

(b)吹氩后夹杂物分布

图 3 钢包吹氩前后夹杂物分布

Fig. 3 The distribution of inclusion in ladle

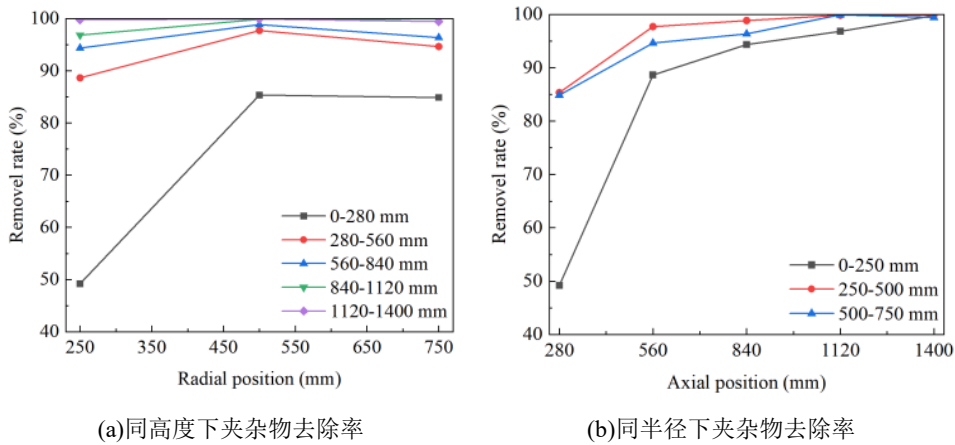


图 4 各区域夹杂物去除率

Fig. 4 Inclusion removal rate at different area

3.3. 夹杂物尺寸对其去除率的影响

进一步对钢包夹杂物整体去除行为进行分析，在数值模拟过程中改变夹杂物尺寸的大小，探究夹杂物尺寸对其去除率的影响规律。因此，钢包分别注入了尺寸为 $1\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 夹杂物，各尺寸夹杂物去除率如图 5 所示。由于小尺寸夹杂物容易在钢液中滞留，且不易被气泡捕捉去除，小尺寸夹杂物去除率远不及大尺寸夹杂物。因此，由图可知，随着夹杂物尺寸增大，夹杂物去除率明显升高，随着吹氩时间的增加，去除率逐渐趋近一致。

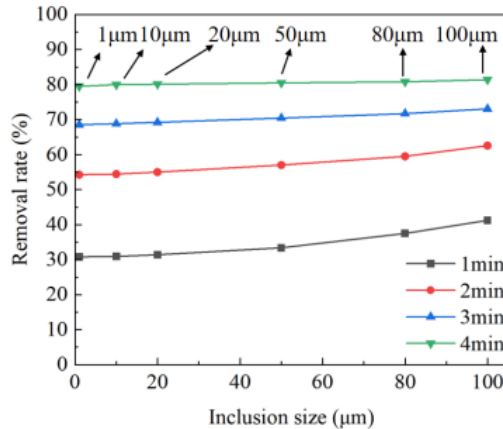


图 5 各区域夹杂物去除率

Fig. 5 Inclusion removal rate at different inclusion size

4. 结论

本研究中，自主开发了 UDF 程序，实现了夹杂物被气泡捕捉去除过程的模拟，既考虑了夹杂物随着钢液流动上浮至渣层这一去除方式，也包含夹杂物被气泡捕获去除这一方式，研究了双孔底吹氩气对不同区域夹杂物的去除效果，以及夹杂物尺寸对其去除率的影响规律：

(1) 钢包底吹氩流场形成以流股-壁面-流股循环流动特征，且位于钢包上半区流场运动速率远大于下半区，对钢包钢液混匀以及各区域夹杂物去除率将有一定影响。

(2) 对各区域夹杂物数量进行统计，结合流场运动状态，下半区气柱两侧区域夹杂物去除效果远不如气柱所在区域以及钢包上半区，而且下半区壁面附近夹杂物去除率低的情况尤为突出。

(3) 对不同尺寸夹杂物去除率计算后, 得到夹杂物尺寸对其去除率影响规律, 随着夹杂物尺寸增大, 夹杂物去除率明显升高, 随着吹氩时间的增加, 去除率逐渐趋近一致。

参考文献

- [1] Kwon Y J, Zhang J, Lee H G. A CFD-based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle during Molten Steel Deoxidation [J]. *ISIJ Int.* 2008, 48(7): 891–900.
- [2] Zhang L F, Taniguchi S. Fundamentals of Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation [J]. *Int. Mater. Rev.* 2000, 45(2): 59–82.
- [3] 王立涛等. 钢包炉吹氩与夹杂物去除[J]. *钢铁研究学报*, 2005, 17(3): 34–38.
- [4] 卢叶等. 透气砖布置和吹氩流量对钢包内钢液流动行为的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(7): 41–47.
- [5] Beskow K, Jia J, Lupis C H P. Chemical Characteristics of Inclusions Formed at Various Stages during the Ladle Treatment of Steel [J]. *Iron making Steelmaking*, 2002, 29(6): 427–435.
- [6] 刘福海等. 120 t LF 底吹流场优化研究[J]. *炼钢*, 2014, 30(5): 34–37.