

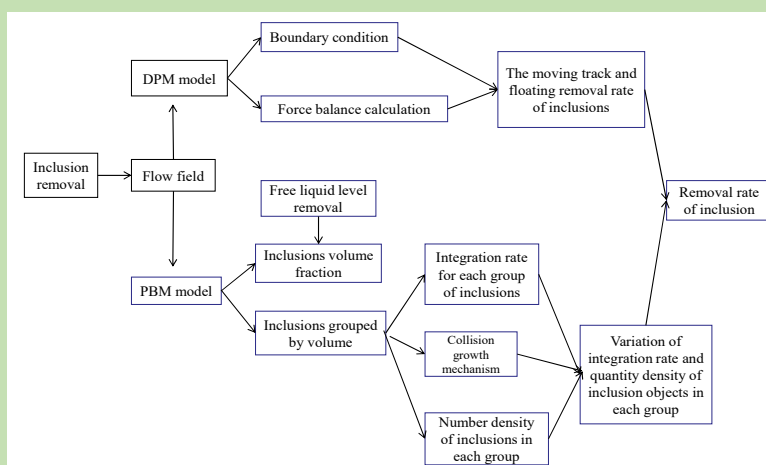
Numerical simulation of collision removal of inclusions in swirling flow tundish

Jinlin LU¹, Dongsheng ZHANG¹, Zhiguo LUO^{1,2*}, Zongshu ZOU^{1,2}

1. School of Metallurgy, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110819, China

2. Key Laboratory of Ecological Metallurgy Multimetallic Mineral (Ministry of Education), School of Metallurgy, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract: The SFT (swirling flow tundish) is a tundish with swirl chamber placed in the flow injection zone. The gravitational potential energy is converted into swirling kinetic energy as the liquid steel flows into the tundish from the bottom of the SC (swirling chamber) through a nozzle along the tangent direction. The swirling molten steel promotes the inclusions to gather towards the center of the swirling chamber, promoting the inclusions to collide and polymerize. In this work, the PBM model in ANSYS Fluent was used to simulate



the growth of inclusions in SFT, the DPM model was used to simulate the removal rate and trajectory of different particle size inclusions. Simulation results showed that the average diameter of inclusions in the tundish without swirling chamber increased from 3.93 μm to 4.25 μm and the inclusion removal rate was 40.07% considering the collision polymerization between inclusions. Under the same operating conditions, the average diameter of inclusions in swirling flow tundish increased from 3.93 μm to 4.35 μm , and the removal rate of inclusions increased from 30.09% to 43.20%. The removal capacity of SFT was better than that of NSCT (non-swirling chamber tundish)

Key words: inclusion removal; collision polymerization; numerical simulation; swirling flow tundish

收稿: 2020-01-14, 修回: 2020-03-17, 网络发表: 2020-04-01, Received: 2020-01-14, Revised: 2020-03-17, Published online: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51604068)

作者简介: 卢金霖(1994-), 男, 河南省鹿邑县人, 硕士研究生, 钢铁冶金专业; 罗志国, 通讯联系人, E-mail: luozg@smm.neu.edu.cn.

引用格式: 卢金霖, 张东升, 罗志国, 等. 旋流中间包夹杂物碰撞去除的数值模拟. 过程工程学报, 2020, 20(12): 1432-1438.

Lu J L, Zhang D S, Luo Z G, et al. Numerical simulation of collision removal of inclusions in swirling flow tundish (in Chinese).

Chin. J. Process Eng., 2020, 20(12): 1432-1438, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220021.

旋流中间包夹杂物碰撞去除的数值模拟

卢金霖¹, 张东升¹, 罗志国^{1,2*}, 邹宗树^{1,2}

1. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819

2. 东北大学冶金学院多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819

摘 要: 旋流中间包是在中间包注流区内设置旋流室, 钢液经长水口从旋流室底部沿着切线方向流入中间包内, 使重力势能转化为旋转动能, 旋转的钢液促使夹杂物向旋流室中心聚集, 促进夹杂物碰撞聚合长大。用 ANSYS Fluent 中的 PBM 模型模拟了夹杂物在旋流中间包内碰撞聚合长大, 用 DPM 模型模拟不同粒径夹杂物的轨迹和去除率。结果表明, 相同操作条件下, 考虑夹杂物之间的碰撞聚合时, 无旋流室中间包的夹杂物平均直径从 3.93 μm 增至 4.25 μm , 夹杂物去除率为 40.07%; 旋流中间包夹杂物的平均直径从 3.93 μm 增至 4.35 μm , 夹杂物去除率从 30.09% 提升至 43.20%。旋流中间包对夹杂物的去除能力优于无旋流室中间包。

关键词: 夹杂物去除; 碰撞聚合; 数值模拟; 旋流中间包

中图分类号: TF777 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2020)12-1432-07

1 前 言

随着我国制造业的转型升级, 制造业对钢铁材料的质量要求越来越高^[1]。中间包冶金是提高钢材洁净度的重要环节^[2], 钢铁生产中常用挡墙挡坝^[3,4]、气幕挡墙^[5]、湍流控制器^[6]等改善钢液的流场、提高洁净度。离心中间包^[7,8]是为了进一步提高钢液洁净度开发出来的新型中间包, 其原理是利用磁场使钢液在旋转室内做离心运动, 由于夹杂物的密度普遍小于钢液, 夹杂物在离心作用下将向旋流的中心聚集, 夹杂物在旋流中心不断碰撞聚合长大, 最终上浮至表面被渣层吸附去除。离心中间包需要外加磁场才能使钢液旋转, 使钢铁的生产成本增大。岳强等^[9]将电磁离心中间包的离心原理与湍流控制器结合起来, 提出构造更简单的旋流中间包去除夹杂物技术, 即在常规中间包中引入旋流室, 钢液依靠自身的势能在水口沿着旋流室侧壁流入旋流室, 在旋流室内产生旋流, 达到与离心中间包同样的效果, 减少了能源的使用。Ling 等^[10]在 2013 年使用商业软件 Fluent 结合 UDF 自编程的方法, 模拟了两流中间包内尺寸为 4~9.2 μm 的夹杂物运动行为, 在湍流碰撞作用下夹杂物碰撞聚合长大, 证明中间包内的夹杂物存在碰撞长大行为。Chen 等^[11]用 CFD-PBM 耦合模型研究了 RH 真空精炼炉内的夹杂物聚集和去除行为, 模拟结果显示钢液中夹杂物数量密度、尺寸分布、夹杂物的体积分数与工业试验有着良好的一致性, 证明了 PBM 模型适用于模拟钢液中夹杂物的碰撞聚集长大行为。文献[12~15]通过水模

实验和数值方法模拟了旋流中间包夹杂物的运动轨迹和去除率, 但未考虑夹杂物之间的碰撞聚合。实际生产中夹杂物之间存在碰撞聚集长大行为, 小粒径夹杂物碰撞聚合长大生成粒径较大的夹杂物, 更有利于夹杂物上浮去除。本工作考虑夹杂物之间的碰撞聚合, 分别用 ANSYS Fluent 中的 PBM 模型和 DPM 模型模拟夹杂物在钢液中的运动行为。用 ANSYS Fluent 中的 PBM 模型模拟夹杂物在旋流中间包内碰撞聚合长大, 得到夹杂物的直径和不同粒径夹杂物的体积分数变化, 即不同粒径夹杂物碰撞后的二次分布。用 DPM 模型模拟夹杂物的去除率和轨迹, 用去除率表示 PBM 模型中不同粒径夹杂物上浮比例, 计算不同粒径的夹杂物上浮数量及留在钢液中的夹杂物数量。最终以钢液中上浮去除的夹杂物总体积与初始夹杂物总体积的比值表示夹杂物总的去除率。

2 数学模型

2.1 控制方程

2.1.1 夹杂物碰撞聚合模型

碰撞聚合模型将钢液相和夹杂物相均视为连续介质。连续性方程和动量守恒方程见式(1)和(2)。

$$\frac{(\partial \rho_k \alpha_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \vec{u}_k) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{(\partial \rho_k \alpha_k \vec{u}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \vec{u}_k \vec{u}_k) = & -\alpha_k \nabla p + \\ & \nabla \cdot \left\{ \alpha_k \mu_{\text{eff}} \left[\nabla \vec{u}_k + (\nabla \vec{u}_k)^T \right] \right\} + \rho_k \alpha_k \vec{g} + F_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ρ_k , α_k 分别为钢液相和夹杂物相的密度和体积分数, p 为钢液相和夹杂物相的压力(Pa), F_k 为夹杂物和钢液两相的相互作用力(N), t 为时间(s), \bar{u}_k 为钢液相的湍流黏性系数, μ_{eff} 为钢液相的有效黏度(Pa·s), g 为重力加速度(m/s^2)。

对夹杂物相进行分组, 第 i 组的夹杂物数量密度群体平衡方程、夹杂物的连续性方程和 Kolmogorov 尺度 η 为

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{u}_i n_i) = B_a - D_a + B_b - D_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p f_i)}{\partial t} + \nabla(\alpha_p \rho_p \bar{u}_i f_i) = S_i \quad (4)$$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (5)$$

其中, n_i 为第 i 组夹杂物的数量密度(m^{-3}), \bar{u}_i 为第 i 组夹杂物的运动速度(m/s), 等式右边 B_a, D_a, B_b, D_b 分别表示因为夹杂物的聚并和破碎导致第 i 组夹杂物的数量增加和减少 [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$], S_i 为由于碰撞聚并导致夹杂物产生的源项, ν 为钢液的运动黏度(m^2/s), x_i 为第 i 组夹杂物在 x 方向上的位移, α_p 为夹杂物体积分数, ρ_p 为夹杂物密度, 中间包内钢液流动时 $\nu=0.9 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, ε 为湍动能的耗散率(m^2/s^3)。本研究只考虑夹杂物的碰撞聚并行为。

f_i 为第 i 组夹杂物的体积分数, α_i 为第 i 组夹杂物体积分数, v_i 为第 i 组单个夹杂物的体积, 它们之间的关系表达式见式(6)和(7):

$$n_i v_i = f_i \alpha_p \quad (6)$$

$$f_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_p} \quad (7)$$

根据上述方程可以得到第 i 组夹杂物的连续性方程:

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p f_i)}{\partial t} + \nabla(\alpha_p \rho_p \bar{u}_i f_i) = S_i \quad (8)$$

当钢液中夹杂物的粒径小于湍流旋涡的临界 Kolmogorov 尺度时, 夹杂物粒子的惯性完全可以忽略, 夹杂物的运动主要依靠分子黏性力的作用; 当夹杂物的粒径大于湍流旋涡的 Kolmogorov 尺度时, 夹杂物的黏性力可以忽略, 夹杂物的运动依靠惯性力的作用。

用 Fluent 模拟中间包流场, 云图显示湍动能耗散率大部分区域位于 $0.02 \sim 0.3 \text{m}^2/\text{s}^3$, 代入式(5)计算临界 Kolmogorov 尺度为 $39 \sim 78 \mu\text{m}$ 。选取 Kolmogorov 临界尺度 $\eta=63 \mu\text{m}$ 。对于夹杂物粒径小于 Kolmogorov 临界尺度时, Saffman 等^[16]提出了碰撞速率表达式:

$$\beta_T(r_i, r_j) = \alpha \sqrt{\frac{8\pi}{15}} \frac{(d_i + d_j)^3}{8} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (9)$$

其中, β_T 为颗粒碰撞速率, r_i 和 r_j 分别为第 i 和 j 组的两个粒子的半径, d_i 和 d_j 分别为两个粒子的直径, α 为体积分数。

夹杂物粒径大于 Kolmogorov 临界尺度时, Abrahamson^[17]提出了碰撞速率表达式:

$$\beta_T(r_i, r_j) = 2^{3/2} \alpha \sqrt{\pi} \frac{(d_i + d_j)^3}{4} \sqrt{U_i^2 + U_j^2} \quad (10)$$

式中, U_i, U_j 分别表示第 i, j 组夹杂物粒子的速度。

2.1.2 夹杂物运动模型

用 Lagrangian 方法在稳态钢液流场的基础上, 根据钢液中夹杂物受力平衡计算夹杂物的运动轨迹^[18]。

夹杂物运动轨迹的计算方程为

$$\frac{dl_p}{dt} = \bar{u}_p \quad (11)$$

式中, l_p 为夹杂物粒子位置(m), \bar{u}_p 为夹杂物颗粒速度(m/s)。

夹杂物的受力平衡方程为

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D + \frac{(\rho_p - \rho)g}{\rho_p} + F_i \quad (12)$$

式中, F_D 为夹杂物粒子的单位质量曳力(N), ρ 和 ρ_p 分别为流体的密度和夹杂物的密度(kg/m^3), F_i 为夹杂物所受的其他力(N)。

2.1.3 夹杂物的去除计算

夹杂物碰撞后的去除率根据 PBM 模型和 DPM 模型的模拟结果计算, 各组的去除率 P_i 和总去除率 P 为

$$P_i = \frac{(N_{\text{out}} \times P_{\text{Di}})}{N_{\text{in}}} \quad (13)$$

$$P = \frac{\sum_i (N_{\text{out}} \times P_{\text{Di}}) \times v_i}{\sum_i N_{\text{in}} \times v_i} \quad (14)$$

式中, N_{out} 为第 i 组夹杂物在中间包出口处的数量密度, N_{in} 为第 i 组夹杂物在中间包入口处的数量密度, P_{Di} 为 DPM 模型中第 i 组夹杂物未考虑碰撞的去除率。

2.2 边界条件

根据前人对 LF 精炼炉的钢试样进行的采样检测, 夹杂物尺寸范围主要集中于 $1 \sim 120 \mu\text{m}$, 夹杂物体积分数为 0.03%, 假设初始状态时夹杂物均匀分布在钢液中。将夹杂物按照 Lister 等^[19]提出的体积组合法 $v_{i+1}/v_i = 2^{1/q}$ 对夹杂物进行划分, 将夹杂物按体积比 $v_{i+1}/v_i = 2.6$ 分成 16 组, 各组参数见表 1。夹杂物粒子的密度为 3900

kg/m³。

对于夹杂物碰撞聚合模型,其边界条件如下:(1) 中间包长水口入口处,钢液为速度入口,速度大小为 1 m/s,夹杂物在入口处的速度与流体速度相同;(2) 中间包壁面挡墙挡坝等固体壁面为无滑移边界条件,不考虑固体壁面对夹杂物的粘附作用;(3) 顶面为自由液面;(4) 出口为自由流出,夹杂物运动到出口会随钢液流入结晶器;(5) 在计算域内设置监测点监测各组夹杂物的体积分率和数量密度的变化。

表 1 各组夹杂物的特征直径、初始数量密度和夹杂物体积分率

Table 1 The characteristic diameter and initial number density and volume fraction of inclusions in each group

Group	Characteristic diameter/ μm	Initial number density/ m^{-3}	Volume fraction
1	1.00	1.36×10^{13}	0.024
2	1.38	1.83×10^{13}	0.083
3	1.89	7.85×10^{12}	0.093
4	2.60	2.81×10^{12}	0.086
5	3.58	1.05×10^{12}	0.084
6	4.92	5.59×10^{11}	0.12
7	6.76	2.38×10^{11}	0.13
8	9.36	6.50×10^{10}	0.093
9	12.8	2.20×10^{10}	0.088
10	17.6	3.29×10^9	0.03
11	24.2	1.04×10^9	0.026
12	33.2	5.11×10^8	0.033
13	45.8	3.50×10^8	0.058
14	62.9	6.93×10^7	0.03
15	86.5	2.37×10^7	0.022
16	119	5.13×10^6	0.015

对于夹杂物运动模型,设置夹杂物与壁面碰撞之后反弹,夹杂物运动至液面被吸附去除。

3 结果与讨论

3.1 旋流中间包模型参数

旋流中间包示意图如图 1 所示,旋流中间包参数见表 2,无旋流室中间包没有旋流装置,其他参数与旋流中间包相同。

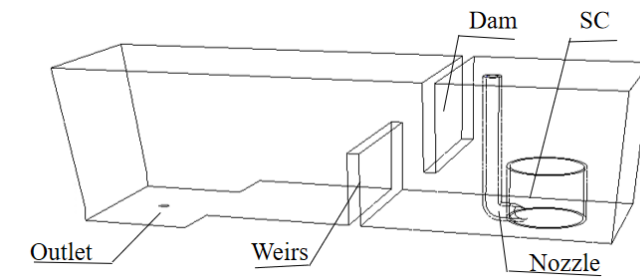


图 1 旋流中间包示意图
Fig.1 Schematic diagram of swirling flow tundish

表 2 旋流中间包模型的尺寸参数

Table 2 Size parameters of swirling flow tundish model

Parameter	Size/mm	Parameter	Size/mm
Bottom length	4500	Top length	5000
Bottom width	1250	Top width	1400
Diameter of SC	600	Height of SC	450
Inner diameter of nozzle	100	Outlet diameter	75
Outer diameter of nozzle	125	Dam height	625
Height	1250	Weirs depth	750

3.2 夹杂物运动轨迹

使用稳态计算旋流中间包的流场,计算收敛后从水口释放夹杂物。直径为 1 和 80 μm 的夹杂物在旋流中间包中的运动轨迹见图 2。从图可以看出,夹杂物在旋流室内随钢液运动而运动,小尺寸夹杂物随流性较好,停留时间更长,更容易跟随流场做旋转运动,不容易上浮去除。随夹杂物尺寸增大,夹杂物上浮速度更快,在钢液中的停留时间减小,更易上浮至中间包顶部被去除。

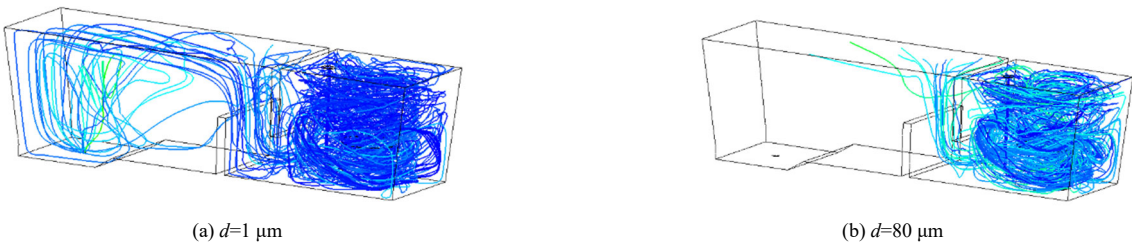


图 2 不同尺寸夹杂物在旋流中间包内的运动轨迹线
Fig.2 Trajectories of inclusions of different sizes in the swirling flow tundish

夹杂物通过顶部渣层上浮去除,得到的夹杂物去除率如图3所示。从图可以看出,随夹杂物直径增加,夹杂物的去除率出现增大的趋势,夹杂物主要通过自身受力上浮去除,小粒径夹杂物受的浮力小,去除率不高,大粒径夹杂物大部分能够上浮去除,不考虑夹杂物碰撞聚合长大的情况下,小粒径夹杂物的去除率不高。

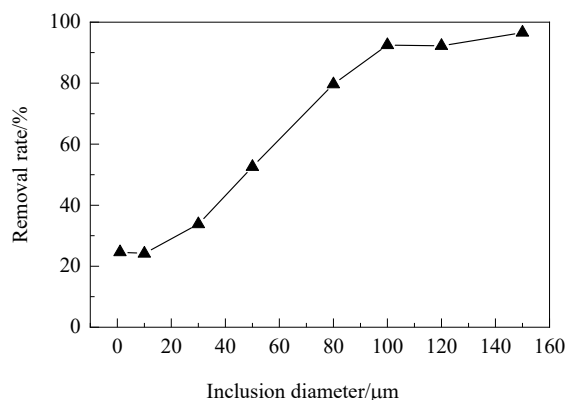


图3 夹杂物通过顶部上浮的去除率

Fig.3 Removal rate of inclusions through the top surface

3.3 碰撞对夹杂物去除率的影响

夹杂物运动行为的模拟过程中,考虑夹杂物之间的碰撞聚合,夹杂物被当做连续的第二相处理,在中间包内钢液流动的过程中,伴随着第二相夹杂物体积分数的变化,旋流中间包和无旋流室中间包在不同时刻夹杂物总的体积分数变化如图4所示。

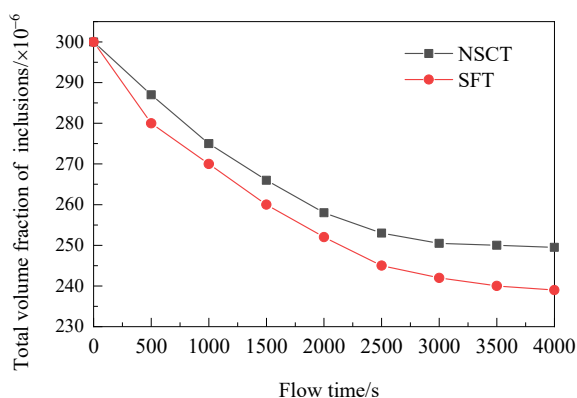


图4 旋流中间包和无旋流室中间包出口处夹杂物的总体积分数随流动时间的变化

Fig.4 Variations of total volume fraction of inclusions at the outlets of swirling flow tundish and non-swirling chamber tundish with the flow time

从图4可看出,计算稳定时,无旋流室中间包的夹杂物总体积分数从0.030%减小至0.025%,减少了16.6%。旋流中间包的夹杂物总体积分数从0.030%减小

到了0.0238%,减少了20.7%。旋流中间包和无旋流室中间包出口处夹杂物的平均直径随流动时间的变化如图5所示,可以看出,计算稳定时,无旋流室中间包出口处夹杂物的平均直径从3.93 μm增至4.25 μm,夹杂物的平均直径增大了8.14%。旋流中间包夹杂物的平均直径从3.93 μm增至4.35 μm,增加了10.68%。在出口处旋流中间包夹杂物平均粒径大于无旋流室中间包,这是因为旋流室的引入使钢液的湍动能主要集中在旋流室中,促使钢液在旋流室内旋转流动,由于夹杂物密度小于钢液密度,在旋流作用下促使夹杂物向旋流室中心运动聚集,增大了夹杂物之间的碰撞概率,有利于夹杂物碰撞聚集长大。

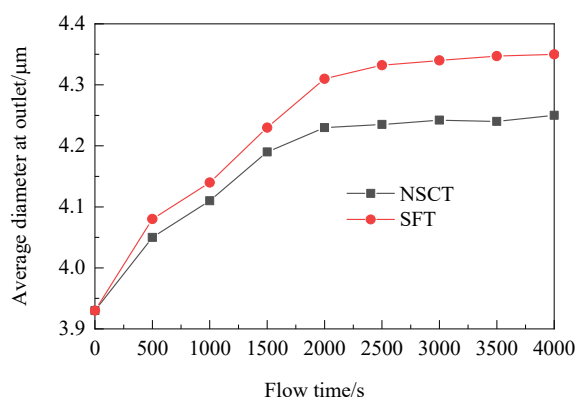


图5 旋流中间包和无旋流室中间包出口处夹杂物的平均直径随流动时间的变化

Fig.5 Variations of average diameter of inclusions at the outlet of swirling flow tundish and non-swirling chamber tundish with the flow time

各尺寸组夹杂物的去除率如图6所示。由图可知,将夹杂物不考虑碰撞和考虑碰撞时的去除率进行对比,旋流中间包夹杂物考虑碰撞的去除率高于未考虑碰撞,由式(13)和(14)计算可得,夹杂物去除率从30.09%提升到43.20%。对比旋流中间包与无旋流室中间包,无旋流室中间包夹杂物去除率为40.07%,旋流室的引入使钢液的湍动能主要集中在旋流室中,在旋流的作用下夹杂物碰撞概率增大,小粒径的夹杂物聚合长大成较大粒径的夹杂物,大粒径的夹杂物有利于上浮去除,夹杂物的去除率提高。对比旋流中间包考虑碰撞的去除率,粒径较小去除率提高比粒径大的明显,随着夹杂物尺寸继续增大,碰撞与否对夹杂物去除率的影响逐渐减小,这是因为小粒径夹杂物碰撞后更易聚合,而大粒径夹杂物碰撞之后不容易聚合成更大的夹杂物。对于夹杂物粒子之间的碰撞长大行为,并非所有的碰撞均能凝聚成新的夹杂物粒子,存在着碰撞效率的问题,Higashitani等^[20]考虑

流体动力学和夹杂物粒子之间的相互作用行为, 提出了湍流有效凝聚系数 α :

$$\alpha = 0.732 \left(\frac{5}{N_T} \right)^{0.242} \quad (15)$$

$$N_T = \frac{6\pi\mu(d_i + d_j)^3}{8H} \cdot \sqrt{\frac{4\varepsilon}{15\pi\nu}} \quad (16)$$

其中, N_T 为黏性力与范德华力的比值, H 为 Hamaker 常数。

从以上两式可以看出, N_T 与两个相互碰撞的夹杂物直径之和的三次方成正比, 而两个夹杂物碰撞之后的有效凝聚系数 α 随 N_T 增大而减小, 因此可知两夹杂物直径之和越小, 碰撞之后越容易聚合长大。

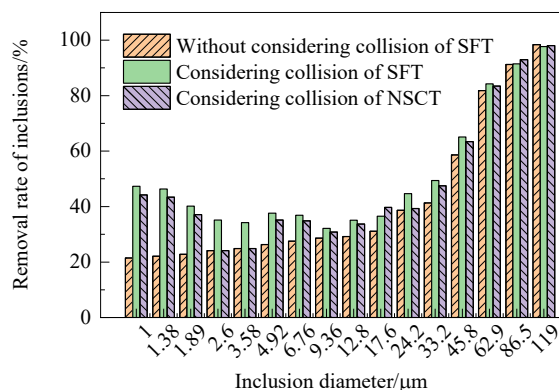


图 6 各尺寸组夹杂物的去除率

Fig.6 Removal rate of inclusions in each group

4 结 论

考虑夹杂物之间的碰撞聚合, 分别用 ANSYS Fluent 中的 PBM 模型和 DPM 模型模拟夹杂物在钢液中的运动行为, 考察了夹杂物在旋流中间包和无旋流室中间包中的碰撞聚合行为, 得到以下结论:

(1) 从夹杂物运动轨迹可看出, 旋流室能使钢液在旋流室中旋转流动, 增大了夹杂物之间的碰撞概率, 夹杂物更容易碰撞长大, 对夹杂物的上浮去除十分有利。

(2) 考虑夹杂物之间的碰撞聚合时, 在相同操作条件下, 无旋流室中间包的夹杂物平均直径从 $3.93 \mu\text{m}$ 增至 $4.25 \mu\text{m}$, 旋流中间包夹杂物的平均直径从 $3.93 \mu\text{m}$ 增至 $4.35 \mu\text{m}$ 。旋流室的加入促进了夹杂物碰撞聚合长大。

(3) 考虑夹杂物碰撞聚合, 无旋流室中间包夹杂物去除率为 40.07%, 旋流中间包夹杂物去除率为 43.20%, 旋流中间包对夹杂物的去除能力高于无旋流室中间包。

参考文献

[1] 徐匡迪, 肖丽俊, 干勇, 等. 新一代洁净钢生产流程的理论解析

[J]. 金属学报, 2012, 48(1): 1–10.

Xu K D, Xiao L J, Gan Y, et al. Theory analysis on the new generation of clean steel production process [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(1): 1–10.

[2] 王建军, 包燕平, 曲英. 中间包冶金学 [M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 5–7.

Wang J J, Bao Y P, Qu Y. Middle package metallurgy [M]. 2nd Ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 5–7.

[3] 张硕, 唐海燕, 刘锦文, 等. 六流 H 型通道感应加热中间包的结构优化 [J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(9): 787–794.

Zhang S, Tang H Y, Liu J W, et al. Structural optimization of a six-strand H-type channel induction heating tundish [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(9): 787–794.

[4] 李洋, 程常桂, 张丰, 等. 连铸板坯中间包内控流装置优化的水模型研究 [J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 1075–1079, 1087.

Li Y, Cheng C G, Zhang F, et al. Water model study on optimization of flow control devices in tundish of continuous slab casting [J]. Foundry Technology, 2017, 38(5): 1075–1079, 1087.

[5] 武光君, 王中学, 高立福, 等. 连铸中间包环形气幕挡墙吹氩冶金技术开发与应用 [J]. 连铸, 2019, 44(5): 21–25.

Wu G J, Wang Z X, Gao L F, et al. Development and application of technology on annular gas curtain in slab continuous casting tundish [J]. Continuous Casting, 2019, 44(5): 21–25.

[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.

Zou T, Kang X, Qu L X, et al. Water model test and application for optimizing flow control device of single flow tundish [J]. Steelmaking, 2019, 35(5): 43–49.

[7] Wang Q Q, Zhang L F, Seetharaman S, et al. Detection of non-metallic inclusions in centrifugal continuous casting steel billets [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(3): 1594–1612.

[8] Wang F, Li B K, Tsukihashi F. Large eddy simulation on flow structure in centrifugal flow tundish [J]. ISIJ International, 2007, 47(4): 568–573.

[9] 岳强, 侯勤福, 邹宗树. 旋流中间包流场的数值模拟 [J]. 材料与冶金学报, 2009, 8(2): 81–83.

Yue Q, Hou Q F, Zou Z S. Numerical simulation of flow field in a swirling flow tundish [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2009, 8(2): 81–83.

[10] Ling H T, Zhang L F. Numerical simulation of the growth and removal of inclusions in the steel of a two-strand tundish [J]. Journal of Minerals, 2013, 65(9): 1155–1163.

[11] Chen G J, He S P, Li Y G, et al. Modeling dynamics of agglomeration, transport and removal of Al_2O_3 clusters in the RH degasser based on CFD–PBM coupled model [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(7): 7030–7042.

[12] Yue Q, Hou Q F, Zou Z S, et al. Aggregation kinetics of inclusions in swirling flow tundish for continuous casting [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(5): 6–10.

[13] Yue Q, Hou Q F, Zou Z S, et al. Water modeling of swirling flow tundish for steel continuous casting [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(5): 17–22.

[14] Hou Q F, Yue Q, Wang H Y, et al. Modelling of inclusion motion and flow patterns in swirling flow tundish with symmetrical and asymmetrical structure [J]. Iron and Steel Institute of Japan International, 2008, 48(6): 787–792.

[15] Hou Q F, Zou Z S. Comparison between standard and

- renormalization group $k-\varepsilon$ models in numerical simulation of swirling flow tundish [J]. ISIJ International, 2005, 45(3): 325–330.
- [16] Saffman P G, Turner J S. On the collision of drops in turbulent clouds [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1956, 1: 16–30.
- [17] Abrahamson J. Collision rates of small particles in a vigorously turbulent fluid [J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30(2): 1371–1379.
- [18] ANSYS. Fluent 14.0 user's guide [M]. Canonsburg: Fluent Inc., 2011: 675–678.
- [19] Lister J D, Smit D J, Hounslow M J. Adjustable discretized population balance for growth and aggregation [J]. American Institute of Chemical Engineer, 1995, 41(3): 591–603.
- [20] Higashitani K, Yamauchi K, Matsuno Y, et al. Turbulent coagulation of particles dispersed in a viscous fluid [J]. Chemical Engineering Journal Japan, 1983, 16(4): 299–304.