

上浮速度对钢渣界面夹杂物去除的影响

刘超 李京社 孙丽媛 杨树峰 唐海燕

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 通过建立夹杂物在钢渣界面及其附近钢液和渣层连续区域的运动模型,研究了上浮速度(Stokes速度,0.1~0.5 m/s)对50~200 μm夹杂物分离去除的影响。研究表明,上浮速度的提高对50 μm以下夹杂物在钢渣界面的分离时间影响不大,而会使50 μm至150 μm的夹杂物分离时间变长,使≥150 μm的夹杂物分离时间缩短,对于150 μm的夹杂物上浮速度由Stokes速度提高到0.5 m/s时,夹杂物分离时间由 260×10^{-5} s缩短到 6×10^{-5} s。

关键词 上浮速度 钢渣界面 夹杂物尺寸 去除

Influence of Floatation Velocity on Removal of Inclusions at Steel-Slag Interface

Liu Chao, Li Jingshe, Sun Liyuan, Yang Shufeng and Tang Haiyan

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The influence of floatation velocity (Stokes velocity, 0.1~0.5 m/s) on separation and removal of 50~200 μm inclusions is studied by established a moving model of inclusions at steel-slag interface and in liquid metal and slag layer continuous zone near the interface. Study results show that with increasing floatation velocity, there is no obvious influence on removal time of less than 50 μm inclusions at steel-slag interface, but the separation and removal time of 50 μm to 150 μm inclusions increases while the separation time of ≥150 μm inclusions reduces, as for instance, for 150 μm inclusions, with the floatation velocity increasing from Stokes velocity to 0.5 m/s, the inclusions separation time reduces from 260×10^{-5} s to 6×10^{-5} s.

Material Index Floatation Velocity, Steel-Slag Interface, Size of Inclusions, Removal

为了满足洁净钢的性能要求,可以从夹杂物的生成及夹杂物的去除两个方面进行控制。钢中夹杂物去除过程主要由夹杂物的聚合长大上浮、在钢渣界面的分离、溶解入渣中3个环节构成。目前关于夹杂物在钢渣界面的分离过程的研究较少。

Nakajima等人^[1-3]提出了夹杂物在钢渣界面的运动过程模型,根据模型得出了一些影响夹杂物在钢渣界面运动的因素。但原模型只对夹杂物在钢渣界面进行了单独分析,而作为一个连续的过程夹杂物在钢渣界面附近的渣层和钢液的运动过程同样对夹杂物的去除有重要的影响。本文建立一个完整连续的模型来讨论夹杂物在钢渣界面及其附近区域的运动和分离过程。

1 模型建立

研究在新建立夹杂物在钢渣界面及其附近的连续区域的运动模型^[4-5]的基础上,通过对不同区域夹

杂物受力分析得出夹杂物的运动方程,从而解出夹杂物在不同速度下,不同粒径夹杂物的运动位移及分离时间。根据Re数的不同夹杂物在钢渣界面的运动可分为有液膜和无液膜两种情况。

文献[2-3]中提出的模型只考虑了夹杂物在钢渣界面的受力分析,本研究所建立的模型考虑了夹杂物在钢渣界面以及其附近的钢液和渣相区域的受力过程,从而得出了夹杂物连续的受力及运动方程。

(1)无液膜情况下夹杂物的受力分析模型。①无液膜情况下夹杂物在钢渣界面的受力分析及运动方程见文献[2-3];②无液膜情况下夹杂物进入渣层后的受力分析参考文献[4]。

夹杂物在钢渣界面附近的运动行为会对夹杂物在钢渣界面的运动产生影响,如夹杂物可能会由渣层反弹回钢渣界面或者是钢液,所以有必要对夹杂物在渣层的受力进行分析,分析后得出的夹杂物运动方程为:

通讯作者:杨树峰,博士,讲师,北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083

E-mail: yangshufeng@ustb.edu.cn

$$\frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} = \frac{2(\rho_s - \rho_l)}{\rho_s + 2\rho_l} - \frac{9\mu_s}{\sqrt{A^3 g}} \frac{1}{(\rho_s + 2\rho_l)} \frac{dZ^*}{dt^*} \quad (1)$$

式中: S - 渣相; l - 夹杂物相; A - 夹杂物的半径/ m ; g - 重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$; Z - 夹杂物的位移/ m ; Z^* - 夹杂物的无量纲位移, 等于 Z/A ; ρ - 物相的密度/ $(kg \cdot m^{-3})$; μ - 物相的粘度/ $(Pa \cdot s)$; t - 时间/ s ; t^* - 夹杂物的无量纲时间, 等于 $t \sqrt{g/A}$ 。

(2) 有液膜形成时夹杂物的受力分析模型。① 有液膜形成时夹杂物在钢渣界面的受力分析及运动方程见文献[2-3]; ② 有液膜情况下夹杂物反弹回到钢液中时的受力分析参考文献[4]。

运动过程中夹杂物可能会被反弹回到钢液中, 此时夹杂物在钢液中的运动方程经过求解后为:

$$\frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} = \frac{2(\rho_M - \rho_l)}{\rho_M + 2\rho_l} - \frac{9\mu_M}{\sqrt{A^3 g}} \frac{1}{(\rho_M + 2\rho_l)} \frac{dZ^*}{dt^*} \quad (2)$$

两种情况下公式如下所示, 无液膜时:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} &= \frac{2(\rho_s \Delta_b - \rho_l)}{\rho_s \Delta_b + 2\rho_l} - \frac{3\sigma_{MS}}{A^2 g (\rho_s \Delta_b + 2\rho_l)} \cdot \\ &\quad \left(Z^* - 1 - \frac{\sigma_{MI} - \sigma_{SI}}{\sigma_{MS}} \right) - \\ &\quad 6 \frac{\mu_s}{\sqrt{A^3 g} (\rho_s \Delta_b + 2\rho_l)} B \frac{dZ^*}{dt^*} \quad 0 < Z^* < 2 \\ \frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} &= \frac{2(\rho_s - \rho_l)}{\rho_s + 2\rho_l} - \frac{9\mu_s}{\sqrt{A^3 g}} \frac{1}{(\rho_s + 2\rho_l)} \frac{dZ^*}{dt^*} \\ &\quad Z^* > 2 \end{aligned}$$

式中: M - 钢液相; Δ_b - 密度相, 等于 $\frac{1}{4} \left(\frac{\rho_M}{\rho_s} - 1 \right) \left(\frac{z}{A} \right)^3 - \frac{3}{4} \left(\frac{\rho_M}{\rho_s} - 1 \right) \left(\frac{z}{A} \right)^2 + \frac{\rho_M}{\rho_s}$; B - 阻力修正系数, 等于 $\left(\frac{\mu_M}{\mu_s} - 1 \right) \left(\frac{z}{A} \right)^2 - 2 \left(\frac{\mu_M}{\mu_s} - 1 \right) \left(\frac{z}{A} \right) + \frac{\mu_M}{\mu_s}$; σ_{ij} - 物相 i 和 j 之间的界面张力。

有液膜时:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} &= \frac{2(\rho_M - \rho_l)}{\rho_M + 2\rho_l} - \frac{9\mu_M}{\sqrt{A^3 g}} \frac{1}{(\rho_M + 2\rho_l)} \frac{dZ^*}{dt^*} \\ &\quad Z^* < 0 \\ \frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} &= \frac{2(\rho_M - \rho_l)}{(\rho_M + 2\rho_l)} - \frac{3\sigma_{MS}}{A^2 g (\rho_M + 2\rho_l)} \cdot \\ &\quad \frac{(2 + S^* - Z^*)(S^* + Z^*)}{(1 + S^*)^3} - \frac{2\mu_s}{\sqrt{A^3 g}} \frac{1}{(\rho_M + 2\rho_l)} \cdot \\ &\quad \left[\frac{3}{2} \left(\frac{1}{1 + 2S^*} - \frac{1}{1 + 4S^*} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{1 - Z^*}{1 + S^*} \right)^3 \right] \cdot \end{aligned}$$

$$\frac{dZ^*}{dt^*} - \frac{9}{\sqrt{A^3 g} (\rho_M + 2\rho_l)} \frac{dZ^*}{dt^*} \quad 0 < Z^* < 2$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Z^*}{dt^{*2}} &= \frac{2(\rho_s - \rho_l)}{\rho_s + 2\rho_l} - \frac{9\mu_s}{\sqrt{A^3 g}} \frac{1}{(\rho_s + 2\rho_l)} \frac{dZ^*}{dt^*} \\ &\quad Z^* > 2 \end{aligned}$$

式中: S - 液膜的厚度/ m ; S^* - 液膜的无量纲厚度, 等于 S/A 。

2 结果及讨论

钢包吹氩过程中钢渣界面处夹杂物的上浮速度在 $0 \sim 1.0$ m/s 波动^[6], 实验中选取 Stokes 速度、 0.1 、 0.3 、 0.5 m/s 来研究速度对各粒径夹杂物在钢渣界面去除过程的影响, 其中 Stokes 速度是根据球形物体在流动中运动受到的阻力等于该球形物体的半径、速度、流体黏度与 6π 的乘积的斯托克斯定律得出夹杂物在钢液中达到稳定时的速度约为 $\frac{2}{9} A^2$

$$(\rho_M - \rho_l) \frac{g}{\mu_M}。$$

通过计算发现当夹杂物在静止钢液中以 Stokes 速度上浮时, 小于 $150 \mu m$ 的夹杂物运动到钢渣界面时不形成液膜, 而大于 $150 \mu m$ 的夹杂物运动到钢渣界面时形成液膜; 而当速度大于 0.1 m/s 时所研究尺寸范围内的夹杂物运动到钢渣界面时都有液膜形成。

经过计算发现根据夹杂物尺寸的不同, 其运动形式分段相似, 区间划分为 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 150$ 、 $150 \sim 200$ 、 $\geq 200 \mu m$ 。各区间曲线如图 1 所示。

50 、 100 、 150 、 $200 \mu m$ 夹杂物在各速度下的分离去除率时间曲线如图 1 所示, 各粒径夹杂物在不同上浮速度下分离时间方框图如图 2 所示。定义夹杂物的分离去除率为夹杂物进入渣层的位移除夹杂物的直径。

由图 1(a) 可看出, $50 \mu m$ 夹杂物速度为 0.1 m/s 时夹杂物的分离时间最长, 而速度为 0.5 m/s 和 0.3 m/s 时的夹杂物分离时间要短于斯托克斯速度下夹杂物的分离时间。在 0.1 m/s 时, 液膜的形成对夹杂物的分离起到了阻碍作用。由图 2 可以看出, 改变夹杂物的上浮速度, 对于 $50 \mu m$ 以下夹杂物的分离时间改变较小, 各速度下夹杂物的分离时间总体相似。

而对于 $100 \mu m$ 的夹杂物有图 1(b) 可以看出, 对于选定的 3 个速度, 夹杂物的分离时间明显大于

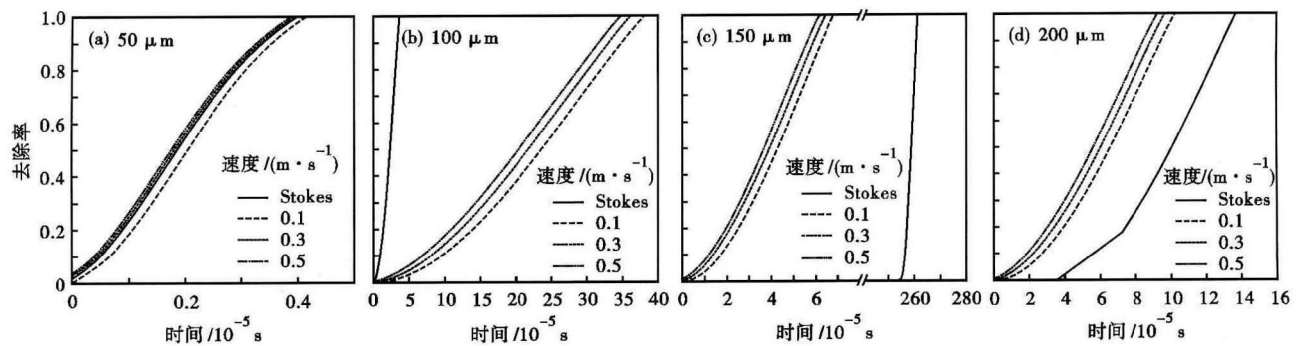


图1 上浮速度对直径为50 μm(a),100 μm(b),150 μm(c)和200 μm(d)夹杂物分离去除率的影响

Fig.1 Influence of terminal floating velocity on separation and removal rate of inclusions with diameter 50 μm (a), 100 μm (b), 150 μm (c) and 200 μm (d)

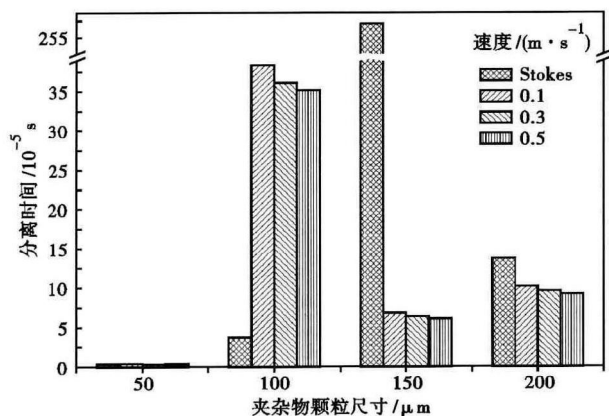


图2 不同尺寸夹杂物在各速度下完全分离时的分离时间

Fig.2 Complete separation time of inclusions with different diameter at each terminal floating velocity

夹杂物在斯托克斯速度下的分离时间。当夹杂物上浮速度为 Stokes 速度时夹杂物在钢渣界面不引起液膜产生,可以在短时间内穿过钢渣界面。说明在较大粒径下,液膜的阻力起主要作用,此时夹杂物速度的增大仍不足以缩短夹杂物的分离时间。

当夹杂物大于 150 μm 时不论以何种上浮速度,在钢渣界面处都有液膜形成。由图 1(c)可以看出,150 μm 夹杂物在 Stokes 速度下的分离时间远远大于夹杂物在另外 3 个选定速度下的分离时间。这主要是因为夹杂物以斯托克斯速度运动到钢渣界面时,由于未能穿透液膜进入渣层而被反弹回到钢液中,使得其分离时间变长。对于 150 μm 的夹杂物速度由 Stokes 上浮速度提高到 0.5 m/s 时,其分离时间由 260×10^{-5} s 缩短到 6×10^{-5} s。且随着速度的增大,夹杂物的分离时间变短。

由图 1(d)可以看出,200 μm 的夹杂物以斯托克斯速度运动时夹杂物的分离时间明显小于其他 3 个选定速度下夹杂物的分离时间。随着速度的提

高,夹杂物达到完全分离的分离时间逐渐变短,速度的提高对于大型夹杂物分离起到了促进作用。

3 结论

(1) 对于 50 μm 以下的夹杂物,提高夹杂物的上浮速度对夹杂物在钢渣界面的分离影响不明显。

(2) 对于 50 ~ 150 μm 的夹杂物提高夹杂物的上浮速度由于液膜的产生,反而使得夹杂物的分离时间变长。但在液膜生成时,随着上浮速度的增大夹杂物的分离时间逐渐变短。

(3) 对于 150 μm 以上的夹杂物,提高上浮速度可以明显缩短其分离时间。如 150 μm 的夹杂物上浮速度由 Stokes 上浮速度提高到 0.5 m/s 时,其分离时间由 260×10^{-5} s 缩短到 6×10^{-5} s。

国家自然科学基金资助(No. 51304016)

参考文献

- [1] Wikstrom J, Nakajima K, Jonsson L, et al. Application of a Model for Liquid Inclusion Separation at a Steel-Slag Interface for Laboratory and Industrial Situations[J]. Steel Research International, 2008, 79(11): 826-834.
- [2] Nakajima K, Okamura K. 4th International Conference on Molten Slags and Fluxes: Inclusion Transfer Behavior Across Molten Steel-Slag Interface[C]. Tokyo, 1992: 505-506.
- [3] Strandh J, Nakajima K, Eriksson R, et al. A Mathematical Model to Study Liquid Inclusion Behavior at the Steel-Slag Interface[J]. ISIJ International, 2005, 45(12): 1838-1839.
- [4] 刘超. 钢渣界面夹杂物分离去除的理论研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2014.
- [5] 孙丽媛. 非金属夹杂物在钢渣界面的去除行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2013.
- [6] Zhu Miao-Yong, Sawada Ikuo, Yamasaki Norimasa, et al. Numerical Simulation of Three-dimensional Fluid Flow and Mixing Process in Gas-stirred Ladles[J]. ISIJ International, 1996, 36(5): 506-511.

刘超(1988-),男,硕士研究生(北京科技大学),2012年重庆大学(本科)毕业,钢渣界面非金属夹杂物的去除。

E-mail: Liuchaoustb@163.com

收稿日期:2014-04-23