

钢液内气泡尾涡去除夹杂物的物理模拟

耿佃桥^{1,2}, 包金峰², 雷洪^{1,2}, 赫冀成^{1,2}

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用物理模拟方法, 基于莫顿数相等及夹杂物运动行为相似准则, 采用聚乙烯粒子模拟钢液中夹杂物, 并采用高速摄像技术记录气泡及夹杂物颗粒的运动行为, 分析了气泡尾涡对夹杂物去除的影响机理. 实验结果表明: 在气泡尾涡作用下, 夹杂物运动轨迹表现为两种方式: 一是夹杂物从气泡下端两侧向气泡尾涡靠近, 随气泡上浮一段距离后上升速度变快, 然后脱离气泡尾涡区; 二是位于气泡上方的夹杂物, 在不与气泡发生碰撞黏附的条件下, 以回旋方式运动至气泡下方, 然后在尾涡区内随气泡上浮, 从而沿竖直方向以回旋方式上升. 在相同上浮距离条件下, 与小气泡相比, 大气泡的尾涡去除夹杂物颗粒的效果更好.

关 键 词: 气泡; 尾涡; 夹杂物; 钢液; 物理模拟

中图分类号: TF 769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)12-1731-04

Physical Simulation of Inclusion Removal by Bubble Trailing Vortex in Liquid Steel

GENG Dian-qiao^{1,2}, BAO Jin-feng², LEI Hong^{1,2}, HE Ji-cheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GENG Dian-qiao, E-mail: gengdianqiao@epm.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the equal Morton number and inclusion movement similarity, the polyethylene particle was employed to simulate inclusions in liquid steel. The high speed video-photography was used to record the movement of bubble and inclusion. The mechanism of inclusion removal by bubble trailing vortex was analyzed. The experimental results show that there are two kinds of inclusion trajectories under bubble trailing vortex. One is that the inclusions approach to the bubble trailing vortex under both sides of bubble and enter the bubble trailing vortex zone, then float with a greater velocity before leaving the bubble trailing vortex zone. The other is that the inclusions above the bubble move to the bubble rear in a circuit manner without collision or attachment each other, then float with bubble in the trailing vortex and rise helically along the vertical direction. On the condition of the same floatation distance, the effect of the larger bubble trailing vortex on inclusion removal is better than that of the smaller bubble.

Key words: bubble; trailing vortex; inclusion; liquid steel; physical simulation

作为国民经济的支柱产业, 钢铁行业在我国工业现代化进程中发挥了不可替代的作用. 然而目前钢铁行业产能过剩, 利润下滑, 但仍有纯净钢等高附加值产品由国外进口, 要求更加严格控制钢中非金属夹杂物的尺寸、分布及形貌. 如用于生产净化管的不锈钢要求全氧含量低于 20×10^{-6} , 且夹杂物尺寸小于 $5 \mu\text{m}$, 弹簧钢要求夹杂物尺寸小于 $20 \mu\text{m}$ 等^[1].

在已知的夹杂物去除手段中, 吹氩是最为经济实用的. 近十几年来, 研究者对钢液内气泡去除

收稿日期: 2015-08-04
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304038); 国家自然科学基金与宝钢联合资助项目(U1460108); 教育部博士学科点新教师基金资助项目(20130042120015); 中国博士后科学基金资助项目(2013M530130); 中国博士后科学基金特别资助项目(2015T80261); 东北大学博士后基金资助项目.
作者简介: 耿佃桥(1982-), 男, 山东淄博人, 东北大学副教授; 雷洪(1973-), 男, 湖北武汉人, 东北大学教授; 赫冀成(1943-), 男(满族), 辽宁瓦房店人, 东北大学教授, 博士生导师.

夹杂物机理进行了广泛而深入的研究^[2-13]. 目前,大多数机理模型^[2-5,8-10]认为钢液中气泡通过黏附去除夹杂物,整个过程分为几个步骤:气泡与夹杂物碰撞,二者黏附形成液膜,夹杂物在液膜滑移,液膜逐渐变薄,液膜破裂形成新的气固接触界面,气泡实现黏附夹杂物,然后气泡与夹杂物一起上浮. 然而,郑淑国等^[13]根据实验结果发现随着气泡粒径的增大,夹杂物去除率呈先减小后增大的趋势,说明在一定条件下,大气泡对于提高夹杂物去除速率有促进作用,因而提出了气泡尾涡捕捉夹杂物的机理. 由于该实验采用的是宏观水模型实验,不能观察单个气泡上浮过程中与模拟夹杂物颗粒的相互作用,因而不能从实验观测角度验证气泡尾涡提高夹杂物去除率的理论. 基于此,本文采用水模型实验方法,用水溶液中气泡行为模拟钢液中气泡行为,并基于水溶液中夹杂物颗粒上浮速度与钢液中夹杂物颗粒上浮速度的运动相似准则模拟钢液中的夹杂物,采用高速摄像机记录并分析气泡上浮尾涡去除夹杂物颗粒的过程,提出了不同的气泡尾涡对夹杂物颗粒的作用机理,并初步研究了气泡大小对尾涡去除夹杂物颗粒的影响.

水模型实验

1.1 实验原理

本文研究钢液中气泡与夹杂物的相互作用机制,因而不需要考虑几何相似. 同时,在整个气泡与夹杂物相互作用过程中,主要作用力有浮力、黏性力和表面张力,因而本文基于反映液相属性的莫顿数(Mo)相等,用水溶液中气泡行为模拟钢液中气泡行为^[14]:

$$Mo = \frac{g\mu_m^4}{\rho_m\sigma_m^3} = \frac{g\mu_p^4}{\rho_p\sigma_p^3}.$$

(1)

式中: μ 为黏度; σ 为表面张力; ρ 为密度; g 为重力加速度;下标 m 和 p 分别代表模型和原型.

钢液中非金属夹杂物的速度可分解为两个速度分量,图 1 为原型和模型钢包中夹杂物颗粒及相关速度示意图,一个是斯托克斯上浮速度分量 v_{sto} ,夹杂物可通过上升至熔池表面而被去除,另一个是随钢液流动的速度分量 v_f . 本文基于水溶液中夹杂物颗粒上浮速度与钢液中夹杂物颗粒上浮速度的运动相似模拟钢液中的夹杂物. 为模拟夹杂物的运动轨迹,二者速度应该对应成比例,可表示如下^[13]:

$$\frac{v_{f,m}}{v_{f,p}} = \frac{v_{sto,m}}{v_{sto,p}}.$$

(2)

将斯托克斯上浮速度表达式代入可得模拟夹杂物尺寸与原型夹杂物尺寸的关系如下:

$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \lambda^{0.25} \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{f,p}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_{f,m}}\right)} \right].$$

(3)

式中: R 为半径; λ 为特征长度比;下标 inc 代表夹杂物;下标 f 代表液相. 根据式(3)即可计算获得钢液中夹杂物与模拟夹杂物的尺寸比.

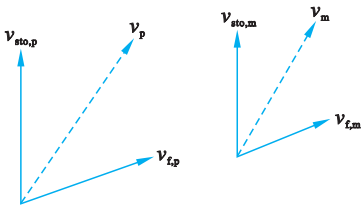


图 1 夹杂物速度合成示意图

Fig. 1 Schematic of composition of inclusion velocities

1.2 实验方法

实验装置如图 2 所示,采用单喷嘴供气方式在水槽底部产生气泡,通过控制喷嘴内径及气体流量来产生大小不同的两种气泡,气泡直径分别为 4 mm 和 9 mm. 实验采用聚乙烯颗粒模拟钢液中的夹杂物,采用高速摄像机(Ultima-Apx)以每秒 125 帧拍摄气泡及夹杂物的运动轨迹,并通过对比气泡与夹杂物的运动照片,采用图像分析软件 Image-Pro Plus 6.0 分析气泡以及夹杂物随气泡尾涡上升过程的运动行为,并对气泡尾涡去除夹杂物的俘获数进行统计.

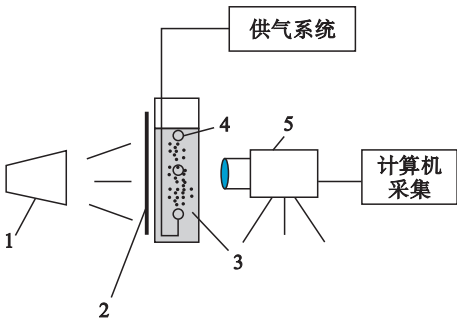


图 2 水模型实验装置

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

1—光源;2—漫射布;3—夹杂物颗粒悬浮液;
4—气泡;5—高速摄像机.

2 结果分析及讨论

2.1 气泡及夹杂物运动过程分析

通过对拍摄结果进行分析观察,发现夹杂物

存在跟随和回旋两种运动行为,一是夹杂物在气泡尾涡区域被直接夹带进入尾涡区,二是夹杂物初始位置在气泡上部,未与气泡碰撞黏附,而是以回旋方式进入气泡尾涡区后随气泡上升.图 3 为典型的夹杂物颗粒跟随气泡运动方式,每张照片拍摄时间间隔为 40 ms.对图 3 同一模拟夹杂物颗粒在不同时刻的照片进行标号,经过分析可以看出,随着气泡的上升,气泡下方会产生一个压力较小的区域,导致夹杂物颗粒向该区域运动,然后随气泡尾涡上升.图 3a 中 1,2 号颗粒一开始即被吸入尾涡区,随气泡上浮加速运动一段时间后,2 号颗粒继续上升,3,4,5 号颗粒也被卷入尾涡区,并跟随气泡上升.图 3e 显示 1 号夹杂物颗粒有向尾涡区外运动的趋势,即逐渐脱离尾涡,并且由于本身的惯性速度,其上浮速度逐渐减小.在实际钢液中为气泡群的运动行为,因而在实际情况下,1 号颗粒完全可以被随后的气泡引入尾涡区继续上升,从而完成气泡尾涡去除夹杂物的整个过程.

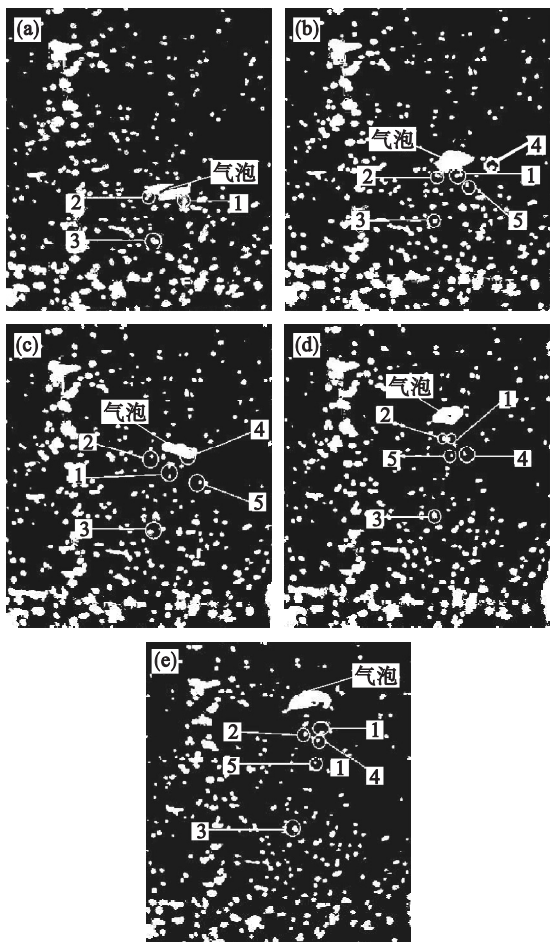


图 3 颗粒跟随气泡尾涡上升过程

Fig. 3 Process of particle rising with bubble trailing vortex

(a) $-t = 0\text{ ms}$; (b) $-t = 40\text{ ms}$; (c) $-t = 80\text{ ms}$;
(d) $-t = 120\text{ ms}$; (e) $-t = 160\text{ ms}$.

当夹杂物颗粒的初始位置位于气泡上方时,当气泡向上运动时,在夹杂物颗粒不与气泡发生碰撞黏附的条件下,夹杂物颗粒会通过回旋方式运动至气泡下部,然后跟随气泡上浮运动,图 4 所示即为该现象,其中每张照片拍摄时间间隔为 40 ms.如图 4a 所示,圈出的两个夹杂物在气泡上部时,气泡向上运动,没有产生碰撞,而是向气泡的左侧运动通过一个回旋过程,如图 4b~4d 所示,运动到气泡下部,如图 4e 所示,进入气泡尾涡,然后跟随气泡上浮.在实际钢液中,气泡在上浮过程中,不断有夹杂物通过回旋进入尾涡区,从而被加速上浮.

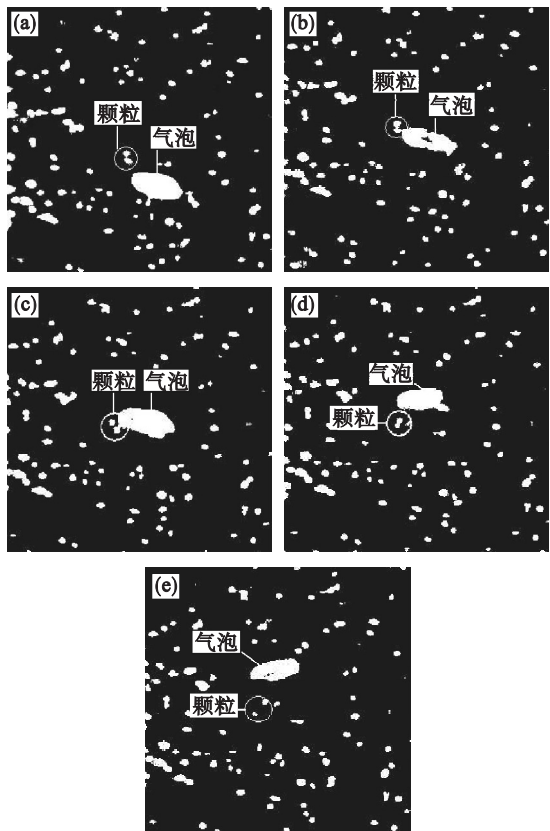


图 4 夹杂物回旋运动过程

Fig. 4 Process of inclusions cyclotron movement

(a) $-t = 0\text{ ms}$; (b) $-t = 40\text{ ms}$; (c) $-t = 80\text{ ms}$;
(d) $-t = 120\text{ ms}$; (e) $-t = 160\text{ ms}$.

图 5 所示为在气泡尾涡作用下的夹杂物颗粒两种不同运动方式.一种是跟随方式,当气泡上浮时,夹杂物颗粒会由于压差的作用直接进入尾涡区,然后跟随气泡上浮,当上升到一定高度后会脱离尾涡区,随着每个气泡的上升,这一现象不断地循环发生,由于气泡的上升是连续行为,因而夹杂物颗粒会不断地随着气泡尾涡上升,进而被带到液面被去除.另一种是回旋方式,当夹杂物颗粒位于气泡上方时,在没有被气泡黏附条件下,夹杂物颗粒会通过一个回旋轨迹运动到气泡底部,进而

随气泡的尾涡上升,在气泡上浮过程中,夹杂物不断回旋进入尾涡区,从而达到去除夹杂物的最终目的。

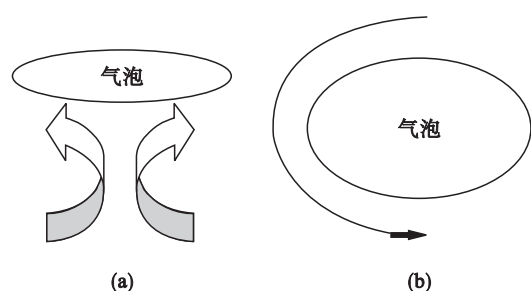


图 5 气泡尾涡作用下夹杂物运动方式示意图
Fig. 5 Schematic of the movement manners of inclusions under bubble trailing vortex
(a)—跟随方式; (b)—回旋方式。

2.2 气泡大小对夹杂物去除的影响

为了研究不同大小气泡尾涡对夹杂物的去除效果,对单气泡上浮经过特定范围时气泡尾涡夹带的夹杂物颗粒数目进行了统计,图 6 所示为在相同上浮距离条件下,气泡尾涡对夹杂物颗粒的捕获个数,4 mm 和 9 mm 的气泡捕获夹杂物颗粒的个数分别为 12 个和 35 个,说明与小气泡相比,大气泡尾涡对夹带去除夹杂物颗粒的效果更好。

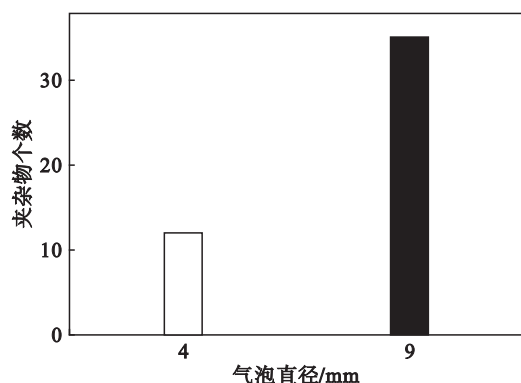


图 6 同等上升距离条件下不同直径气泡尾涡捕获夹杂物颗粒数目
Fig. 6 Number of captured inclusions by bubble trailing vortex with different bubble diameters on the condition of the same flotation distance

3 结 论

1) 除气泡黏附夹杂物颗粒外,实验结果表明尾涡也是一种重要的夹杂物去除方式。

2) 在气泡尾涡去除夹杂物过程中,夹杂物运动轨迹表现为两种方式:一是夹杂物从气泡下端两侧向气泡尾涡靠近,随气泡上浮一段时间后上升速度变快,然后脱离气泡尾涡;二是位于气泡上方的夹杂物,在不与气泡发生碰撞黏附的条件下,

以回旋方式运动至气泡下方,然后随尾涡上浮,并在惯性作用下沿竖直方向以回旋方式上升。

3) 在相同上浮距离条件下,与小气泡相比,大气泡尾涡去除夹杂物颗粒的效果更好。

参考文献:

- [1] 徐匡迪,肖丽俊.特殊钢精炼中的脱氧及夹杂物控制[J].钢铁,2012,47(10):1-13.
(Xu Kuang-di, Xiao Li-jun. Deoxidation and inclusion control in special steel refining[J]. *Iron and Steel*, 2012, 47(10): 1-13.)
- [2] Wang L H, Lee H G, Hayes P. Prediction of the optimum bubble size by flotation for inclusion removal from molten steel[J]. *ISIJ International*, 1996, 36(1): 7-16.
- [3] Yoon R H, Luttrell G H. The effect of bubble size on fine particle flotation[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1989, 5(1/2/3/4): 101-122.
- [4] Miki Y, Thomas B G. Model of inclusion removal during RH degassing of steel[J]. *Iron and Steelmaker*, 1997, 24(8): 31-38.
- [5] Felice V D, Daoud I L A, Dussoubs B, et al. Numerical modelling of inclusion behavior in a gas-stirred ladle[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(7): 1273-1280.
- [6] Zhang L, Taniguchi S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation[J]. *International Materials Reviews*, 2000, 45(2): 59-82.
- [7] Söder M, Jonsson P, Jonsson L. Inclusion growth and removal in gas-stirred ladles[J]. *Steel Research International*, 2004, 75(2): 128-138.
- [8] Zhang L, Aoki J, Thomas B G. Inclusion removal by bubble flotation in a continuous casting mold[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2006, 37(3): 361-379.
- [9] 薛正良,王义芳,王立涛,等.用小气泡从钢液中去夹杂物颗粒[J].金属学报,2003,39(4):431-434.
(Xue Zheng-liang, Wang Yi-fang, Wang Li-tao, et al. Inclusion removal from molten steel by attachment small bubbles[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(4): 431-434.)
- [10] Wang L T, Zhang Q Y, Deng C H, et al. Mathematical model for removal of inclusion in molten steel by injecting gas at ladle shroud[J]. *ISIJ International*, 2005, 45(8): 1138.
- [11] Zhang L, Taniguchi S, Matsumoto K. Water model study on inclusion removal from liquid steel by bubble flotation under turbulent conditions[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2002, 29(5): 326-336.
- [12] Kwon Y, Zhang J, Lee H G. Water model and CFD studies of bubbles dispersion and inclusions removal in continuous casting mold of steel[J]. *ISIJ International*, 2006, 46(2): 257-266.
- [13] 郑淑国,朱苗勇.吹氩钢液精炼过程气泡去夹杂机理研究[J].钢铁,2008,43(6):25-29.
(Zheng Shu-guo, Zhu Miao-yong. Mechanism of inclusion removal from molten steel by bubbles during the refining process with argon blowing[J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(6): 25-29.)
- [14] Maxworthy T, Gnann C, Kurten M, et al. Experiments on the rise of air bubbles in clean viscous liquids[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 321: 421-441.