

气泡尾流去除钢液中夹杂物机理的水模型研究

杨虎林^{1,2} 何平¹ 翟玉春²

(1 钢铁研究总院冶金工艺研究所,北京 100081; 2 东北大学材料与冶金学院,沈阳 110004)

摘要 采用水模型和高速摄像机研究了气泡尾流去除夹杂物的过程,分析了气泡尾流去除夹杂物的规律和气泡大小及夹杂物的尺寸和浓度对气泡尾流去夹杂的影响。结果表明,气泡尾流有利于促进夹杂物上浮;气泡尾流中存在尾流边界区和上升区;尾流去除夹杂物的过程分为3个子过程:(1)夹杂物靠近和进入气泡尾流边界区产生扰动;(2)进入气泡尾流上升区和(3)夹杂物继续上升或脱离气泡尾流上升区;气泡直径 D_b 和粒子浓度 C_p 增大有利于尾流去夹杂;粒子直径 D_p 越小越容易被尾流去除。

关键词 气泡尾流 夹杂物去除 机理 钢液 水模拟 非金属夹杂物

A Study of Water Modelling on Mechanism of Removal of Inclusions in Molten Steel by Bubble Wake

Yang Hulin^{1,2}, He Ping¹ and Zhai Yuchun²

(1 Metallurgical Technology Research Department, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The removing process of inclusions by bubble wake in steel has been studied by using water model and high speed video recorder and the rule of inclusions removing through bubble wake and the effect of bubble size and inclusion size and concentration on inclusions removing by bubble wake are analyzed. Results show that the bubble wake is favourable to promote the inclusions floating off; there are boundary zone and rising zone in bubble wake; the removing process of inclusions has three sub-processes: (1) inclusions approaching and entering into the boundary zone to produce disturbance, (2) entering into the bubble wake rising zone and (3) inclusions going on rising up or escaping from bubble wake rising zone to float off; with increasing bubble diameter D_b and particle concentration C_p are available to remove inclusions in steel by bubble wake; the smaller the particle diameter D_p , the easier the inclusions to be remove by bubble wake.

Material Index Bubble Wake, Removal of Inclusions, Mechanism, Molten Steel, Water Modelling, Non-Metallic Inclusions

气泡上浮去夹杂是清洁钢液的一个重要方式^[1],现有研究表明,气泡上浮去除夹杂物的机理可以归结为两种^[2-3]:(1)气泡粘附去除夹杂物;(2)气泡尾流去除夹杂物。针对气泡粘附去除夹杂物的研究相对较多^[4-8],而且被广泛应用于精炼过程夹杂物的数学模拟^[9-13],但是针对气泡尾流去除夹杂物的研究还很少。实验采用水力模型和高速摄像机研究了气泡尾流去除夹杂物粒子的过程,分析了气泡尾流去除夹杂物的规律,对气泡尾流进行了分区,考察了不同大小的单一气泡以及不同大小和浓度的夹杂物对气泡尾流去夹杂的影响。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置如图1所示。该容器采用有机玻璃制成,长为20 cm,宽5 cm,高40 cm,在容器底部留有吹气孔,实验时从吹气孔处吹入空气,吹入的空气流量采用高精度的气体转子流量计进行调整。容器侧

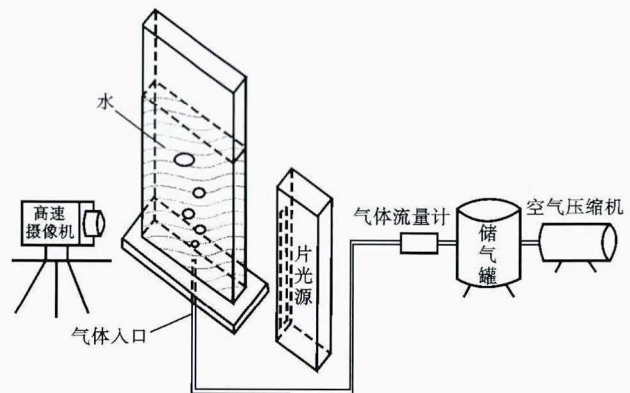


图1 水模型实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of water modelling test device

部有片光源进行光强度补偿,正前方用高速照相机和摄像机对实验过程进行记录。

1.2 实验内容

实验选用空气模拟氩气,选用自来水模拟钢液,PS (Polystyrene-聚苯乙烯)粒子模拟钢液中的非金

属夹杂物。实验过程中空气流量在 0.05 ~ 0.21 L/min 的范围内变化,PS 粒子的密度为 1.02 g/cm³,接触角是 91°,粒度范围为 15 ~ 589 μm。

实验步骤分为:(1)粒子在水浴上方用注射器添加,并使其均匀分散于水中;(2)在容器底部气体入口处吹入足够流量的空气,使气体进入水浴后形成的气泡尺寸满足实验要求;(3)通过高速摄像机和照相机记录气泡尾流与夹杂物的行为。气泡在水浴中的上升高度为 19 cm;(4)用画像解析法对气泡尾流去除夹杂物的行为进行统计。定义 1 个气泡产生的尾流在整个水浴内单位时间所带动上浮的夹杂物模拟粒子的个数为俘获速度 $V(n_p/s)$,通过对高速照相机记录的 1 s 中的所有画像进行统计,计算出每个气泡产生的尾流对夹杂物粒子的俘获速度。气泡为椭球状时,气泡直径 D_b 采用气泡长轴的直径值,夹杂物模拟粒子 D_p 直径为粒子长轴和短轴长度之和的平均值。

2 结果与讨论

2.1 气泡去除夹杂物的主要方式

实验现象表明,气泡粘附和气泡尾流是气泡去除夹杂物的两种方式。从图 2 可见,两种去除方式的表现形式分别为夹杂物从气泡上面与气泡碰撞而被粘附和夹杂物进入气泡侧下方与尾流一起上升,夹杂物的运动轨迹在气泡中轴水平线(图 2 中的虚线)上方的可视为粘附去除,在下方的可视为尾流去除。实验主要针对气泡尾流去除夹杂进行研究。

2.2 气泡尾流去除夹杂物的过程监测

实验采用孔径为 7 mm 的单孔喷嘴进行底吹,PS 粒子的粒度大小在 350 ~ 498 μm。在底吹形成单一气泡串的情形下,采用高速摄影获得夹杂物即 PS 树脂颗粒进入气泡尾流区,然后随气泡尾流上升的过程,实验结果见图 3。

图 3 是直径在 350 ~ 495 μm 的夹杂物模拟粒子被一个约 10 mm 的冠状气泡尾流俘获的情形。在气泡上浮过程中,气泡侧下方的液体去填补气泡脱离和上升导致的容积空隙,由此形成了气泡尾流。当夹杂物靠近快速上浮的气泡尾流区时,由于此区压力比较低,夹杂物很容易被卷入

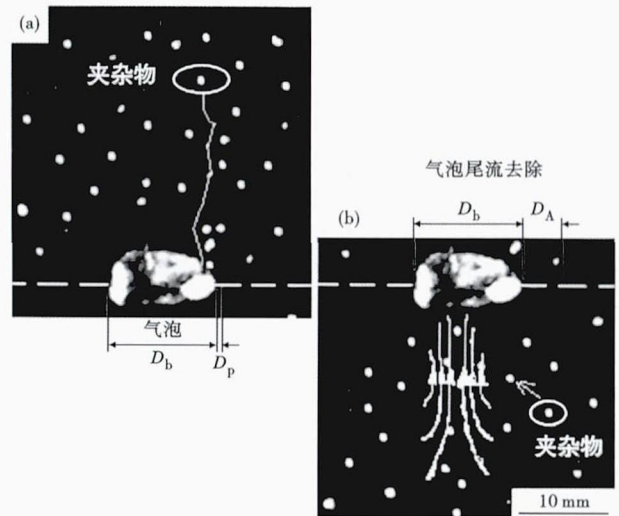


图 2 (a)气泡粘附;(b)气泡尾流去除夹杂物粒子的过程
Fig.2 Process of inclusion particles removing by bubble adhesion (a) and bubble wake (b)

尾流区。由图 3 可见,液体中的夹杂物在尾流流场的影响下,首先慢慢靠近和进入尾流区域(图 3a, b),然后随同尾流一起上升(图 3c, d)。夹杂物在上升一段距离后,速度发生了变化:一部分夹杂物继续向上运动,直至液体表面;而另一部分夹杂物则在向上运动的同时开始向侧方向运动,直至脱离气泡尾流区域,重新悬浮在液体中,最终未能被带至液体表面(图 3e, f)。由此表明,气泡尾流对夹杂物上浮有很大的促进作用。钢液中的夹杂物,一部分被气泡上升形成的尾流带到钢液表面被渣层吸收去除,另

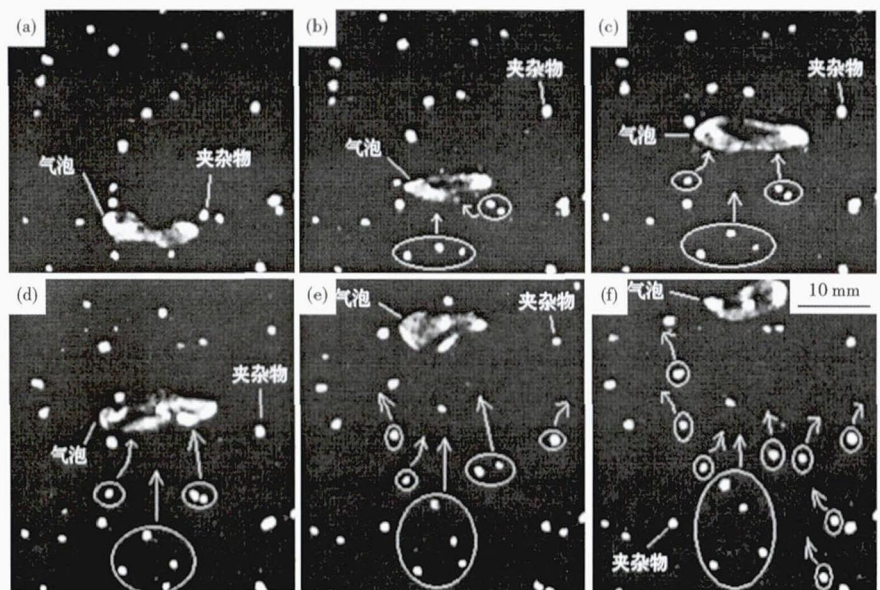


图 3 气泡尾流去除夹杂物粒子的过程,时间 t/s : (a)0; (b)0.016 667; (c)0.033 333; (d)0.050 000; (e)0.083 333; (f)0.100 000

Fig.3 Process of inclusion particles removing by bubble wake, time t/s : (a) 0; (b) 0.016 667; (c) 0.033 333; (d) 0.050 000; (e) 0.083 333; (f) 0.100 000

一部分则在上升过程中脱离了气泡尾流区域,未能被去除。

2.3 气泡尾流去除夹杂物的规律分析

根据实验观察的气泡尾流流场规律简化图 3,可得到图 4 的气泡尾流去除夹杂物粒子的示意图。

由图 4 可知,气泡尾流存在两个区:尾流边界区和尾流上升区。高 H_A 和宽 D_A 的虚线矩形框为尾流边界区,如图 4(1)所示。定义气泡下表面到 Y 轴方向尾流边界面的高度定义为尾流边界高度 H_A ,X 轴方向的尾流边界面的距离为尾流边界直径 D_A 。高 H_R 和宽 D_R 的虚线矩形框为尾流上升区,如图 4(2)所示。设能使夹杂物上升的尾流高度定义为尾流上升区高度 H_R ,能使夹杂物上升的尾流的直径定义为尾流上升区直径 D_R 。

根据气泡尾流中的两个区域,气泡尾流去除夹杂物的过程可以分解为 3 个子过程:

(1) 靠近和进入尾流边界区。在气泡尾流边界区内,夹杂物粒子将受到尾流的影响,产生扰动,该过程简称为“靠近和进入尾流边界区”。通过分析高速照相机记录的大量尾流去夹杂图像和实验现象发现,尾流边界区的范围基本为高 $H_A = 7 D_b$,宽 $D_A = 2 D_b$ 。

(2) 进入气泡尾流上升区。夹杂物进入尾流上升区后随气泡尾流一同上升,在尾流上升区内,夹杂物 Y 轴方向的速度分量大于 0。该过程可简称为“进入尾流上升区”。通过考察大量实验图像和实验现象发现,尾流上升区的范围基本为高 $H_R = 5.5 D_b$,宽 $D_R = 1.5 D_b$ 。

(3) 继续上升或脱离尾流上升区。进入尾流上升区后,夹杂物粒子在尾流区流场的影响下速度发生变化。当夹杂物 X 轴方向的速度分量不等于 0 或 Y 轴方向的合力分量小于 0 时,夹杂物粒子开始脱离尾流上升区,再次进入尾流边界区内扰动或脱离尾流边界区依靠自身密度和钢水密度差而自由上浮。否则将在尾流上升区中继续上升。该过程简称为“继续上升或脱离尾流上升区”[图 4(3)]。

其中过程(1)和过程(2)中夹杂物进入气泡尾流的方式有:①侧尾流区;②下尾流区。由此可以看

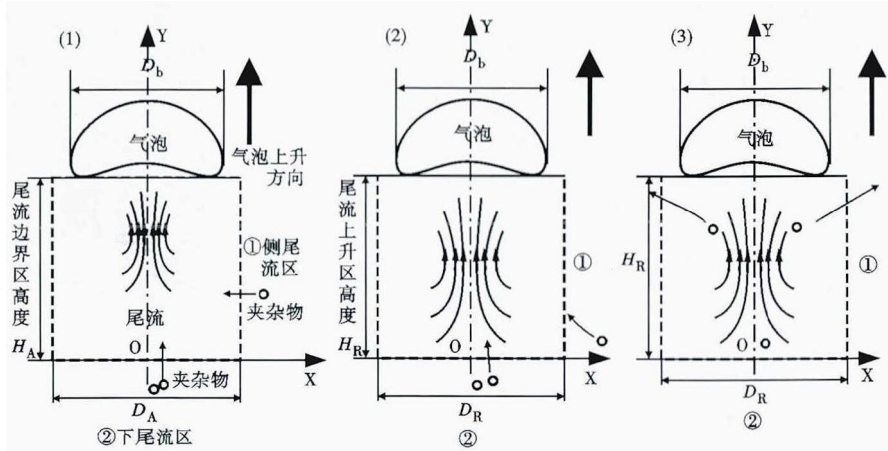


图 4 气泡尾流去除夹杂物粒子过程示意图:夹杂物粒子靠近和进入气泡尾流边界区(1),进入气泡尾流上升区(2),继续上升或脱离气泡尾流上升区(3)

Fig. 4 Schematics of sub-processes of inclusion particles removing by bubble wake, inclusion particles approaching and entering into bubbler wake boundary zone (1), entering into bubble wake raising zone (2) and going on rising up or escaping from bubble wake raising zone (3)

出,夹杂物的进入尾流上升区环节和继续上升或脱离尾流上升区环节可能单独进行,也可能同时进行。实验观察发现,大多数情形下,两者是同时进行的。

2.4 气泡尾流去除夹杂物影响因素研究

气泡尾流去除夹杂物的过程受到诸多因素的影响,主要有气泡直径 D_b 、夹杂物直径 D_p 和夹杂物浓度 C_p 等。俘获速度 V 可通过对高速照相机记录的图像分析统计后获得。

(1) 气泡直径 D_b 对尾流去夹杂的影响。实验采用不同的底吹元件进行底吹,产生的气泡直径分别约为 2.5, 5, 7, 9, 10.5, 12 mm。在此实验过程中,整个体积内单位时间通过的气泡个数,即气泡速率 N_b (n_b/s) 为定值。夹杂物直径为 198 ~ 350 μm ,浓度约为 25 n_p/cm^3 。气泡尺寸对俘获速度的影响如图 5(a)所示,纵轴为气泡整个水浴内单位时间对夹杂物粒子的俘获速度 V (n_p/s),横轴为气泡直径 D_b (mm)。由图 5(a)可以看出,随着气泡直径的增大,气泡尾流对夹杂物粒子的俘获速度 V 逐渐增大。这是因为气泡直径小于 3 mm 时气泡为球状,3 ~ 10 mm 时为椭球状,大于 10 mm 时为球冠状。当气泡形状随着气泡直径的增大从球状到椭球状再到球冠状时,气泡产生的尾流效果愈加明显,因此对夹杂物的去除更有利。

(2) 夹杂物直径 D_p 对尾流去夹杂的影响。实验选用 PS 的粒子按粒度大小 (μm) 分为以下 5 组: 15 ~ 83, 83 ~ 198, 198 ~ 350, 350 ~ 495, 495 ~ 589。夹杂物浓度为 25 n_p/cm^3 ,气泡直径为 6 mm。夹杂物

尺寸对俘获速度的影响表 1 所示。由表 1 可看出,在气泡速率、气泡尺寸和夹杂物浓度为定值时,粒子尺寸 D_p 和俘获速度 V 成反比,也就是说,夹杂物粒子越大,夹杂物被气泡尾流去除越容易。这主要是因为夹杂物粒子的尺寸越小,在受到尾流的作用力时,更容易被尾流控制,所以最终的俘获速度 V 呈现出随着夹杂物尺寸增大而减小的趋势。

(3) 夹杂物浓度 C_p 对尾流去夹杂的影响。夹杂物粒子浓度 C_p (n_p/cm^3) 分别约为 5, 10, 15, 25, 30 五个值,实验过程中,气泡速率 N_b 一定,夹杂物直径为 15 ~ 83 μm ,气泡直径 9 mm。从图 5(b) 可以看出,随着夹杂物粒子浓度 C_p 的增大,气泡尾流对夹杂物粒子的俘获速度 V 逐渐增大,尾流去除夹杂物粒子的效率也越大。

表 1 夹杂物粒子直径 D_p 对俘获速度 V 的影响

Table 1 Effect of diameter of inclusion particles D_p on capture rate V

夹杂物直径 $D_p/\mu\text{m}$	俘获速度 $V/(n_p \cdot \text{s}^{-1})$
15 ~ 83	12.2
83 ~ 198	9.5
198 ~ 350	7.4
350 ~ 495	5.7
495 ~ 589	4.5

参考文献

- [1] Miki Y, Thomas B G. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish [J]. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 1999, 30(4): 639-654.
- [2] Zhang L F, Thomas B G. Numerical Simulation on Inclusion Transport in Continuous Casting Mold [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials (Eng Ed), 2006, 13(4): 293-300.
- [3] Zhang L F, Aoki J, Thomas B G. Inclusion Removal by Bubble Flotation in a Continuous Casting Mold [J]. Metall Mater Trans B, 2006, 37(3): 361-379.
- [4] Pan W, Uemura K, Koyama S. Cold Model Experiment on Entrapment of Inclusions in Steel by Inert Gas Bubbles [J]. Tetsu-to-Hagane, 1992, 78(8): 87-94.
- [5] Wang L, Lee H G, Hayes. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation [J]. ISIJ International, 1996, 36(1): 7-16.
- [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] 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.
- [8] Wang L T, Zhang Q Y, Li Z B, et al. Fundamental of Inclusion Removal from Molten Steel by Rising Bubble [J]. Journal Iron and Steel

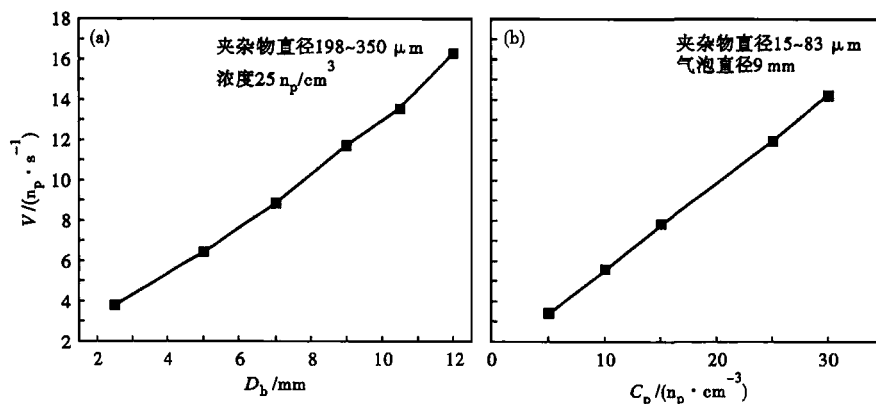


图 5 气泡直径 D_b (a) 和夹杂物粒子浓度 C_p (b) 对俘获速度 V 的影响

Fig. 5 Effect of bubble diameter D_b (a) and concentration of inclusion particles C_p (b) on capture rate V

3 结论

(1) 气泡尾流对夹杂物上浮有促进作用; 气泡尾流存在尾流边界区和尾流上升区两个区域。

(2) 气泡尾流去除夹杂物粒子的过程可分解为 3 个子过程: ①夹杂物靠近和进入气泡尾流边界区, ②夹杂物进入气泡尾流上升区, ③夹杂物继续上升或脱离尾流上升区。而后两个子过程大多数情形下是同时进行的。

(3) 气泡直径 D_b 越大, 对促进夹杂物上浮越有利。夹杂物直径 D_p 越小越容易被尾流去除。夹杂物粒子浓度 C_p 越大, 尾流去夹杂效率越高。

国家科技支撑计划课题基金项目资助(2012BAE03B01)

Research International, 2004, 11(6): 5-9.

- [9] Zheng X F, Hayes P C, Lee H G. Particle Removal from Liquid Phase using Fine Gas Bubbles [J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1091-1097.
- [10] Miki Y, Thomas B G, Denisov A. Model of Inclusion Removal during RH Degassing of Steel [J]. Iron Steelmaker, 1997, 24(8): 31-38.
- [11] Söder M, Jönsson P, Jonsson L. Inclusion Growth and Removal in Gas-stirred Ladles [J]. Steel Research, 2004, 75(2): 128-138.
- [12] Wang L T, Zhang Q Y, Peng S H, et al. Mathematical Model for Growth and Removal of Inclusion in a Multi-tuyere Ladle during Gas-stirring [J]. ISIJ International, 2005, 45(3): 331-337.
- [13] Sheng D Y, Söder M, Jönsson P, et al. Modeling Micro-inclusion Growth and Separation in Gas-stirred Ladles [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2002, 31(2): 134-147.

杨虎林(1986-), 男, 钢铁研究总院冶金工艺所博士研究生, 精炼理论和工艺技术研究。E-mail: yanghulin2612261@163.com

收稿日期: 2013-08-21