

气泡粘附去除钢液中夹杂物的水模拟研究

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, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对钢液中气泡粘附去除夹杂物的问题, 采用水模拟试验对气泡粘附去除夹杂物的机理进行研究。通过高速摄像机和图像处理软件监测气泡粘附去除夹杂物的过程, 考察气泡直径、夹杂物直径和接触角等因素对气泡粘附去除夹杂物的影响规律。结果表明: 气泡粘附夹杂物上浮是去除钢液中夹杂物的一种有效方式。该方式分为气泡向夹杂物靠近; 气泡与夹杂物发生碰撞并粘附; 夹杂物在气泡底部处于不断振荡摆动的动态稳定状态等3个过程。气泡尺寸越小, 夹杂物尺寸和接触角越大, 粘附速度越大。底吹流量恒定时, 减小气泡尺寸可有效提高气泡粘附去除夹杂物效率。

关键词: 钢液; 气泡尾流; 夹杂物去除; 机理; 水模拟

中图分类号: TF769.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2013)06-0045-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2013.06.010

Water Modeling Experiment of Removing Inclusions from Molten Steel by Bubble Adhering

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

(1. Metallurgical Technology Research Department, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China)

Abstract: In order to make clear how non-metallic inclusions were removed from molten steel through bubble adhesion, water modeling was carried out to monitor the process with high-speed video and image processing software. The mechanism of inclusion removal by bubble adhering was analyzed, and the influencing factors including bubble diameter, inclusion diameter, and inclusion contact angle were also investigated. The results show that it is an effective way to remove inclusions with bubble adhering. The adhering process can be divided into 3 sub-processes: first, the bubbles get close to the inclusion particles; second, the bubbles collide with the particles and attach to them; finally, the particles float up with the bubbles in dynamic stability. When the bottom blowing flow rate is constant, it is effective to decrease the bubble size to improve the efficiency of remove inclusions by adhering to bubbles.

Key words: molten steel, bubble wake flow, inclusion removal, mechanism, water model

0 引言

夹杂物的数量、大小和分布是衡量钢的纯净度

的重要指标, 冶金过程中希望尽可能多地去除夹杂物。气泡上浮去夹杂是清洁钢液的一个重要方式^[1]。现有研究结果表明, 气泡上浮去除夹杂物可

收稿日期: 2013-08-21

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAE03B01)。

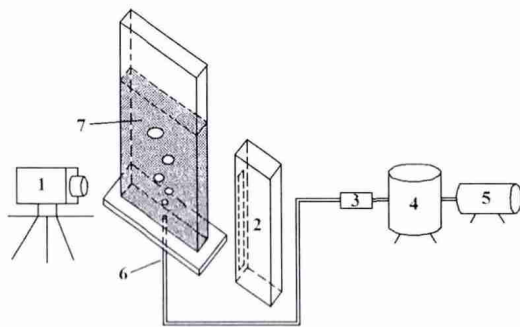
作者简介: 杨虎林(1986—)男, 甘肃平凉人, 在读博士生, 主要从事精炼理论和工艺技术研究。

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。气泡粘附去除夹杂物的研究已经较多^[3-10]。文献[4]对层流状态下钢液中气泡粘附去除夹杂物的一些基础理论进行了讨论,但是气泡粘附去除夹杂物的过程没有相应的试验验证,且没有对气泡粘附夹杂的机理进行分析。文献[5-10]都是对气泡粘附去除夹杂物的应用,对其粘附去除的过程和机理尚不明确。笔者采用高速照相机对气泡粘附去除夹杂物的过程进行直观监测,考察气泡和夹杂物的尺寸以及夹杂物的接触角等因素对气泡粘附去除夹杂物的影响规律,为气泡粘附去除夹杂物研究提供了理论依据,完善了气泡去除夹杂物的理论基础。

1 试验装置与内容

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示。该容器采用有机玻璃制成,长为 20 cm,宽为 5 cm,高为 40 cm,在容器底部留有吹气孔,试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试验过程进行记录。



1—高速摄像机; 2—片光源; 3—气体流量计; 4—储气罐; 5—空气压缩机; 6—气体入口; 7—水
1—High speed video camera; 2—Light sheet; 3—Gas flow meter; 4—Gasholder; 5—Air compressor; 6—Gas inlet; 7—Water bath

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

1.2 试验内容

试验用空气模拟氩气,水模拟钢液,选用不同密度,与水接触角不同的粒子模拟钢液中的非金属夹杂物。试验过程中空气流量范围为 0.05 ~ 0.21 L/min,颗粒粒度范围为 15 ~ 589 μm,所用的聚丙烯

PP (Polypropylene)、聚苯乙烯 PS (Polystyrene)、ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene plastic)、聚氯乙烯 PVC (Polyvinylchloride)和聚乙烯 PE (Polyethylene)等粒子的物性参数如表 1 所示。

试验步骤分为三步:第一,粒子在水浴上方用注射器添加,并使其均匀分散于水中。第二,在容器底部气体入口处吹入空气。第三,通过高速摄像机和照相机记录气泡与夹杂物的行为。气泡在水浴中的上升高度为 19 cm。

表 1 PP、PS、ABS、PVC 和 PE 粒子的物性参数
Table 1 Physical parameters of PP, PS, ABS, PVC and PE particles

夹杂物模拟粒子	密度/(g·cm ⁻³)	接触角/(°)
聚丙烯 PP	0.86	118
聚苯乙烯 PS	1.02	91
ABS	1.04	72
聚氯乙烯 PVC	1.358	87
聚乙烯 PE	0.88	102

2 试验结果与分析

2.1 气泡去除夹杂物的方式

试验现象表明,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。本文主要针对气泡粘附去除夹杂物进行研究。

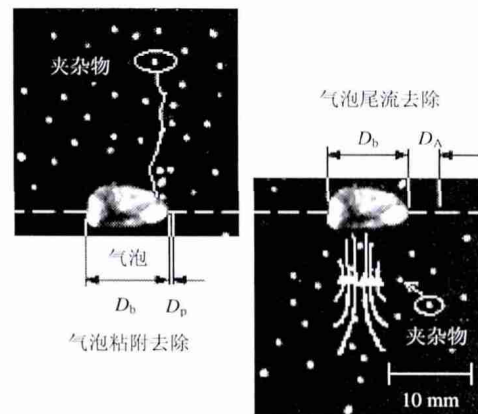


图 2 气泡去除夹杂物的方式

Fig. 2 Ways of inclusion removal by bubble

2.2 气泡粘附去除夹杂物的过程监测

试验采用透气塞进行底吹,聚丙烯 PP 颗粒模拟非金属夹杂物。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聚丙烯 PP 颗粒与气泡在水中相互碰撞、粘附,最终将夹杂物颗粒带出水浴的过程,试验结果见图 3。

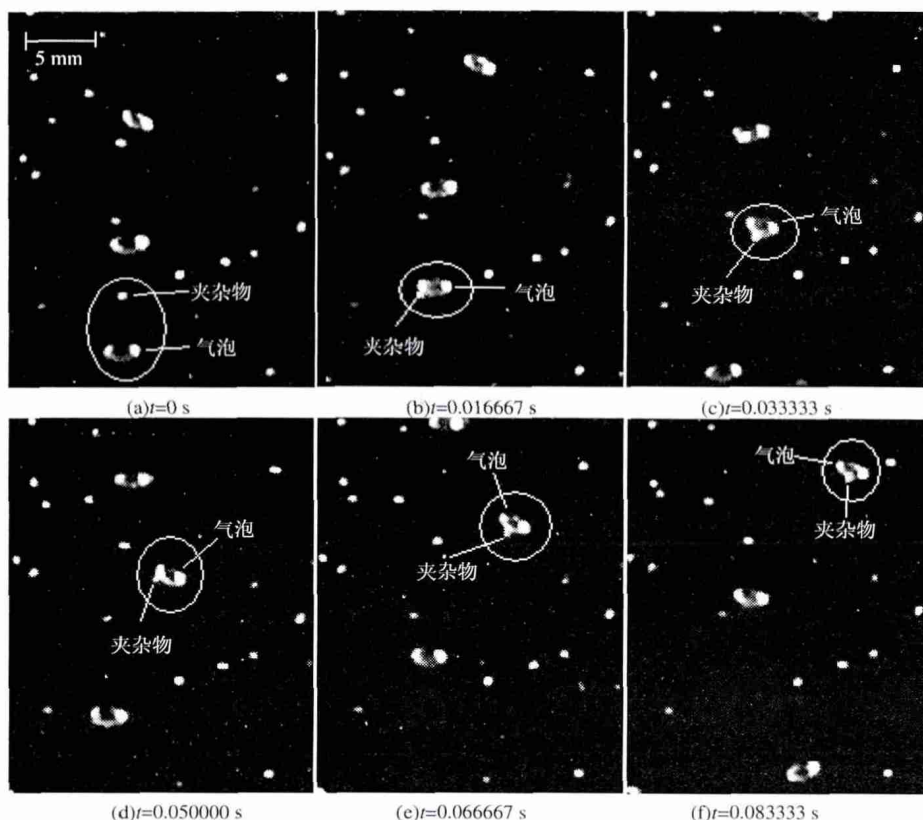


图 3 气泡粘附去除夹杂物过程

Fig. 3 Processes of inclusion removal by bubble adhesion

图 3 是直径在 $350 \sim 495 \mu\text{m}$ 的夹杂物模拟粒子被一个约 3 mm 的椭球形气泡俘获的情形。由图 3 可见,在气泡上浮过程中,气泡上表面慢慢的靠近气泡上方的夹杂物(见图 3(a)),随后与夹杂物发生碰撞,形成气泡与夹杂物核团(见图 3(b))。夹杂物与气泡表面接触后,在气泡表面发生微小振荡后滑移,然后和气泡形成动态的稳定状态(见图 3(c)~(e)),最终气泡粘附着夹杂物一起上浮(见图 3(f))。大量试验结果表明,当气泡粘附夹杂物后,夹杂物脱离气泡的情形几乎不会发生。因此,气泡粘附夹杂物上浮是去除钢液中夹杂物的一种有效方式。

该过程可分解为三个子过程:①气泡向夹杂物靠近,见图 3(a);②气泡与夹杂物发生碰撞后粘附,形成气泡-夹杂物核团,见图 3(b);③夹杂物在气泡底部不断振荡摆动,与气泡一起上浮,夹杂物与气

泡处于动态的稳定状态,见图 3(c)~(f)。

2.3 气泡粘附去夹杂的影响因素分析

夹杂物能否被气泡稳定粘附主要受 R_b 、 R_p 和 θ 的影响。不同大小的气泡,不同尺寸和接触角的夹杂物,气泡稳定粘附夹杂物的难易程度也不同。以下试验将对气泡半径 R_b 、夹杂物半径 R_p 和夹杂物接触角 θ 对气泡粘附夹杂物的影响规律进行考察。试验中,气泡尺寸和夹杂物尺寸分别采用气泡直径 D_b 和夹杂物直径 D_p 表示。

定义 1 个气泡在整个水浴内单位时间碰撞的粒子个数为碰撞速度 V_c (n_p/s),定义 1 个气泡在整个水浴内单位时间粘附的粒子个数为粘附速度 V_A (n_p/s)。定义 V_A/V_c 为粘附效率。粘附速度 V_A 可通过对高速照相机记录的画像进行统计后获得。气泡为椭球状时,气泡直径 D_b 采用气泡长轴的长度,夹杂物粒子直径 D_p 为粒子长轴和短轴长度之和的平均值。

1) 气泡直径 D_b 对粘附去夹杂的影响

试验采用透气塞 0.5、1、1.5 mm 口径的喷嘴进行底吹,产生的气泡尺寸分别约为 1、3、5、7 mm。夹杂物粒子选用接触角为 118° 的 PP 颗粒。在此试验过程中,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。气泡尺寸对碰撞速度和粘附速度的影响如图 4 所示,纵轴为整个水浴内气泡单位时间与夹杂物粒子的碰撞速度 V_C (n_p/s) 和粘附速度 V_A (n_p/s)。横轴为气泡直径 D_b (mm)。由图 4 可看出,在气泡速率为定值时,随着气泡直径的增大,碰撞速度和粘附速度都减小,也就是说:气泡尺寸越小,气泡和夹杂物粒子发生碰撞和粘附的概率越大。另外还可以看出,随着气泡直径的增大,碰撞速度下降明显,而粘附速度变化较小。

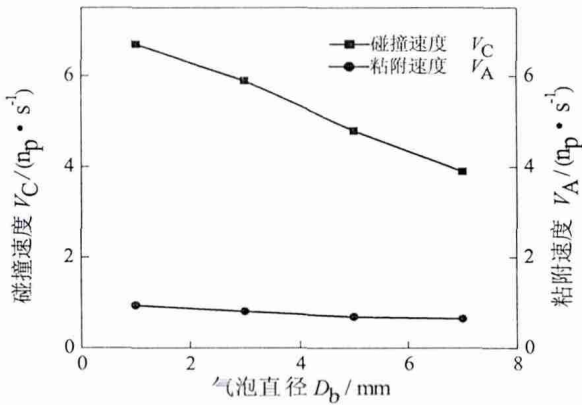


图 4 气泡直径 D_b 对碰撞速度 V_C 和粘附速度 V_A 的影响

Fig. 4 Effect of bubble diameter D_b on collision rate V_C and adhesion rate V_A

这主要是因为:随着气泡尺寸的增加,气泡上浮速度减慢,对其上方的液体产生的驱动力增大,气泡排开其上方液体的作用增强,使得液流中的更多夹杂物随着液流向气泡中心轴外侧运动,因此碰撞速度随着气泡直径的增大呈减小趋势。气泡直径为 3 mm 和 7 mm 时其上方夹杂物的流动情形如图 5 所示。在气泡直径为 3 mm 时,气泡上浮过程中其上方夹杂物产生的扰动很小;而气泡直径为 7 mm 时,气泡上浮过程中其上方夹杂物向气泡两侧运动。由气泡粘附夹杂物的过程可知,气泡粘附夹杂需要夹杂物首先与气泡发生碰撞然后发生粘附行为,随着气泡直径的增大,由于碰撞速度减小了,故气泡与夹杂物粘附速度也相应降低。统计试验结果后发现,不论气泡大小,气泡上浮过程中一旦粘附夹杂物,其

数量基本都在 1~2 个,气泡与夹杂物的碰撞次数对气泡粘附夹杂物的个数影响较小,因此随着气泡直径的增大,粘附速度的变化较小。由以上试验结果可以推断:当底吹流量恒定时,减小气泡尺寸可有效提高气泡粘附去除夹杂物的效率。

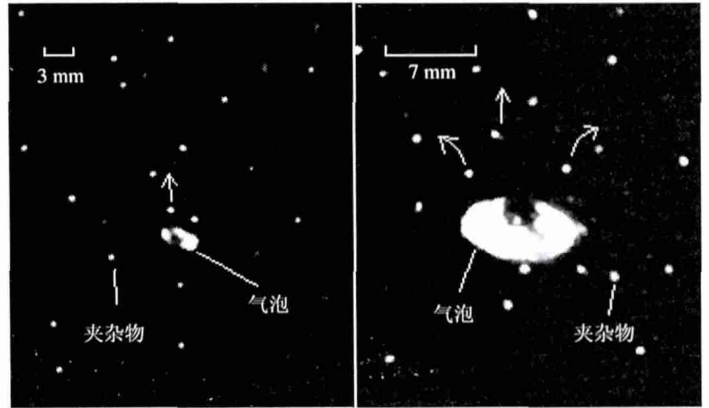


图 5 气泡直径 D_b 对气泡上方夹杂物流动的影响

Fig. 5 Effect of bubble diameter D_b on the flow of the inclusions above the bubble

2) 夹杂物直径 D_p 对粘附去夹杂的影响

试验选用 PP 粒子,按粒度大小分为 15~83、83~198、198~350、350~495、495~589 μm 五组。在此试验过程中,气泡速率 N_b 、气泡直径 D_b 和夹杂物浓度 C_p (n_p/cm^3) 为定值。夹杂物直径对粘附速度的影响如图 6 所示。由图 6 可看出,随着粒子直径增大,粘附速度 V_A 增大。这主要是因为夹杂物直径增大,其上浮速度增大,在气泡直径一定时,气泡与夹杂物之间的相对速度就减小,夹杂物在气泡表面的滑行时间增大,液膜破裂的可能性就越大,从而使得粘附速度增大。

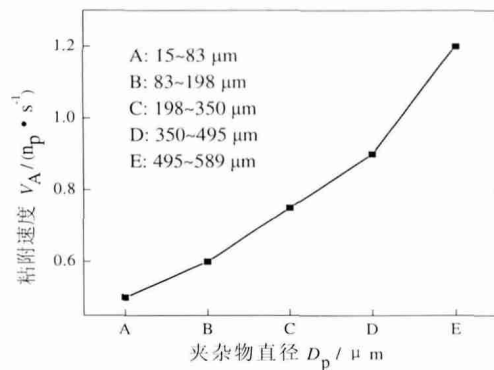


图 6 夹杂物直径 D_p 对粘附速度 V_A 的影响

Fig. 6 Effect of inclusion diameter D_p on adhesion rate V_A

3) 夹杂物接触角 θ 对粘附去夹杂的影响

试验采用 PP、PE、PS、PVC 和 ABS 颗粒模拟夹杂物, 其接触角分别是 118° 、 102° 、 91° 、 87° 和 72° 。试验过程中, 气泡速率 N_b 、气泡直径 D_b 和夹杂物浓度 C_p 为定值。粒子的接触角 θ 对粘附速度 V_A 和粘附效率 V_A/V_C 的影响如图 7 所示。可以看出, 随着接触角的增加, 粘附速度和粘附效率都呈增大趋势, 尤其在 87° 到 91° 时, 粘附速度分别为 0.4 和 0.6, 粘附效率分别为 0.73 和 0.89, 两者的增大趋势都比较明显。这主要是因为: 随着接触角 θ 的增大, 夹杂物粒子与气泡之间液膜破裂的临界厚度增加, 液膜破裂时间减小, 夹杂物颗粒更容易划破液膜从而粘附在气泡表面, 因此粘附速度 V_A 增大。而从试验的统计结果发现, 当气泡速率、气泡直径和夹杂物浓度为定值时, 气泡和夹杂物的碰撞速度不变, 故夹杂物的粘附效率也呈增大趋势。

3 结论

通过对气泡粘附去除钢液中夹杂物的水模拟研究, 得出如下结论:

1) 气泡粘附夹杂物上浮是钢液中去除夹杂物的一种有效方式。

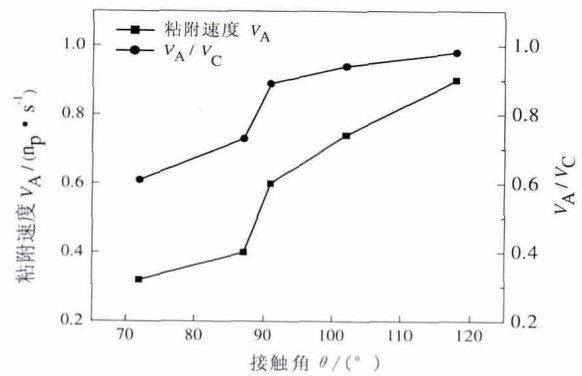


图 7 接触角 θ 对粘附速度 V_A 和粘附效率 V_A/V_C 的影响

Fig. 7 Effect of contact angle θ on adhesion rate V_A and adhesion efficiency V_A/V_C

2) 气泡粘附夹杂物分为三个过程: ① 气泡向夹杂物靠近; ② 气泡与夹杂物发生碰撞并粘附; ③ 夹杂物在气泡底部不断振荡摆动, 没有脱离, 与气泡一起上浮, 夹杂物与气泡处于动态的稳定状态。

3) 气泡直径越小, 夹杂物直径和接触角越大, 粘附速度越大。当底吹流量恒定时, 减小气泡尺寸可以有效提高气泡粘附去除夹杂物的效率。

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] Zhang L F, Taniguchi S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation [J]. International Materials Reviews, 2000, 45(2): 59-82.
- [5] Miki Y, Thomas B G, Denissov A, et al. Model of inclusion removal during RH degassing of steel [J]. Iron Steelmaker, 1997, 24(8): 31-38.
- [6] 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.
- [7] Xue Z L, Wang Y F, Wang L T, et al. Inclusion removal from molten steel by attachment small bubbles [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(4): 431-434.
(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] Söder M, Jönsson P, Jonsson L. Inclusion growth and removal in gas-stirred ladles [J]. Steel Research, 2004, 75(2): 128-138.
- [9] 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.
- [10] 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.