

· 工艺材料进展 ·

精炼时利用小气泡搅拌去除钢液中的氢和夹杂物

赵晶晶 程树森

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 通过理论计算研究和分析了钢液气泡直径、吹气量和吹气时间对精炼时去氢和夹杂的影响。氩气经透气砖进入钢液后会形成大量的气泡,小气泡在钢液中能有效地增大脱气面积,有利于减小钢液中的氢含量。夹杂物与气泡的粘附上浮是钢液中去除夹杂物的一种有效方式,气泡越小,夹杂物越大,夹杂物就越容易去除。在钢包精炼过程中,应使用小气泡来达到较好的去氢和去夹杂效果,气泡的最优直径为 1~3 mm。

关键词 吹氩 小气泡 氢 夹杂

Hydrogen and Inclusion Removal from Liquid Steel by Small Bubbles Stirring during Refining

Zhao Jingjing and Cheng Shusen

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

Abstract The effect of gas bubble size, injection rate and blowing time on removal of hydrogen and inclusion in liquid steel during refining has been studied and analyzed by theory calculation. A large number of bubbles form in liquid steel as the argon gas injection through porous brick. Small bubbles are available to increase the degassing area in liquid steel and favorable to decrease hydrogen content in steel. Inclusion adhering to bubble then going up is an effective way to remove the inclusions, and the smaller the bubbles and the larger the inclusions, the easier to remove the inclusions from liquid steel. During ladle refining, it is available to remove the hydrogen and the inclusions in liquid steel by small injecting bubbles, and the optimum bubble diameter is 1~3 mm.

Material Index Argon Gas Injection, Small Bubble, Hydrogen, Inclusions

气体经透气砖进入金属液后会产生大量气泡,通过透气砖向金属液中鼓入惰性气体是一种重要的精炼工艺,具有搅拌熔池、提高反应速率以及去气、去夹杂等作用^[1,2]。利用微气泡对金属液进行净化处理已在制铝业中被广泛应用,小气泡主要由旋转喷嘴产生^[3]。目前有许多学者对小气泡在炼钢工艺中的应用进行了研究^[4~6],但多集中在水模型试验的基础上,且对气泡的去夹杂机理也尚不明确。本文从理论出发,分析了气泡在钢液中的去气去夹杂效果,通过理论计算,比较了不同因素对气泡的去气和去夹杂速率的影响,找出了在精炼过程中有利于钢液去气和去夹杂的最优气泡直径。

1 气泡的去氢效果

钢包底部通过透气砖吹入氩气会形成大量气泡,由于气泡内 H₂ 的分压较低,使得钢液中的 [H] 不断向气泡扩散。钢液脱氢主要包括 3 个步骤^[7]: (1) 钢液中的氢原子通过钢液边界层扩散到氩气泡的表面; (2) 氢原子在气泡-钢液界面上发生化学反

应; (3) 反应生成的氢分子扩散到气泡内部并随之上浮排出钢液。通常认为 [H] 在钢液中的扩散为限制环节,郭可切^[8]等根据扩散定律及边界层传质理论,导出了液体金属中的去气速率公式:

$$\ln \frac{[H]_t}{[H]_0} = - \frac{2N_B \pi d_B^2}{V_m} \left(\frac{D u_B}{\pi d_B} \right)^{1/2} t \quad (1)$$

式中: [H]_t - t 时刻钢液中 [H] 的百分含量; [H]₀ - 钢液中 [H] 的初始百分含量; d_B - 气泡的直径; u_B - 气泡的上浮速度; D - [H] 在钢液中的扩散系数,在 1 600 °C 的钢液中其值为 1.5 × 10⁻⁷ m²/s^[7]; V_m - 钢液的体积; N_B - 在单位时间内产生的气泡数量。

假设钢液中气泡的尺寸相同,且气泡的大小与吹气量无关,则 N_B 的表达式为:

$$N_B = \frac{6Q}{\pi d_B^3} \frac{T_m}{T_0} \quad (2)$$

式中: Q - 吹气量; T_m、T₀ - 分别为钢液的温度 1 600 °C 和室温 25 °C。

通讯作者:程树森,教授,北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083

$$\ln \frac{[H]_t}{[H]_0} = -\frac{12Q}{V_m} \frac{T_m}{T_0} \left(\frac{Du_B}{\pi d_B^3} \right)^{1/2} t \quad (3)$$

t 时刻 $[H]$ 在钢液中的去除率 $\eta_{[H]}$ 可表示为:

$$\eta_{[H]} = ([H]_0 - [H]_t) / [H]_0 \quad (4)$$

气泡在钢液中的上浮速度 u_B 取决于气泡的大小。由于钢液中气泡的上浮速度较难测量,许多学者利用水模型实验研究了气泡在水中的最终上浮速度^[9-11],得出了气泡上浮速度与其大小的关系,如图 1(a)所示。本文以这些研究结果的平均值作为钢液中气泡的上浮速度 u_B ,且认为气泡在上升过程中速度保持不变。

对于容量为 120 t 的钢包,图 1(b)给出了当吹气时间为 5 min 时,在不同吹气量下气泡直径对钢液中 $[H]$ 去除率的影响。在钢液中 $\eta_{[H]}$ 随着吹气量的增大而增大,但随气泡直径的增大而减小。当气泡直径为 20 mm 时, $\eta_{[H]}$ 小于 50%,在吹气量较小的情况下(5 m³/h), $\eta_{[H]}$ 仅为 10%。而对于小于 3 mm 的气泡来说,当吹气量大于 10 m³/h 时,钢液中的 $[H]$ 基本上可以被完全去除。这是因为小气泡有效地增大了气液接触面积,较好地提高了钢液的脱气效果。由此可见,在实际生产中,为产生较高的脱氢率,钢液中的气泡要尽量保持在 3 mm 以下。

2 气泡的去夹杂效果

2.1 气泡粘附夹杂物的最大粒径

钢液中的夹杂物可以通过粘附到气泡表面上的方式而被去除。当夹杂物穿过气泡表面的长度 z 大于其半径 r_p 时,可以认为夹杂物与气泡稳定吸附。假设气泡和夹杂物均为球形,且 $r_p \ll r_B$,则当夹杂物粘附在气泡表面时其受到 4 个力的作用^[12],即重力 G 、浮力 F_B 、界面张力 F_σ 和毛细管压力 F_C ,其示意

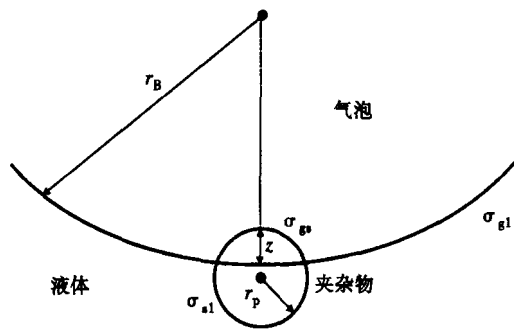


图 2 夹杂物粘附在气泡表面上的示意图

Fig. 2 Schematic of inclusion adhering to bubble surface

图见图 2。

考虑到夹杂物被气泡稳定吸附时的临界状态,即当夹杂物通过气泡表面的距离 $z = r_p$ 时,作用在夹杂物上的力处于平衡状态,则有:

$$F_B = G + F_\sigma + F_C \quad (5)$$

其中各个力的表达式如下:

$$\text{重力 } G = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p g \quad (6)$$

$$\text{浮力 } F_B = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_l g + \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_g g \quad (7)$$

$$\text{毛细管压力 } F_C = \frac{1}{2} \times 4 \pi r_p^2 \frac{2\sigma_{gl}}{r_B} \quad (8)$$

界面张力:

$$F_\sigma \Big|_{z=r_p} = -\frac{dE_r}{dz} \Big|_{z=r_p} = -\frac{d}{dz} [2\pi r_p z \sigma_{sg} + (4\pi r_p^2 - 2\pi r_p z) \sigma_{sl} - \pi(2r_p z - z^2) \sigma_{gl}] = 2\pi r_p^2 \left(\sigma_{sl} - \frac{\sigma_{sg}}{r_p} \right) \quad (9)$$

以上式子中: ρ_l - 钢液的密度,对于 Q235 碳钢来说,其值为 7 000 kg/m³; ρ_p - 夹杂物的密度,对于 SiO₂ 夹杂来说,其值为 2 800 kg/m³; σ_{gl} - 氩气-钢液的界面张力,为 1.4 N/m; σ_{sg} - 夹杂物-氩气的界面张力,为 0.6 N/m; σ_{sl} - 夹杂物-钢液的界面张力,为 1.0 N/m; r_p 、 r_B - 分别为夹杂物和气泡的半径/m; z - 夹杂物穿过气泡表面的长度/m。

将以上各力的表达式代入式(5)得:

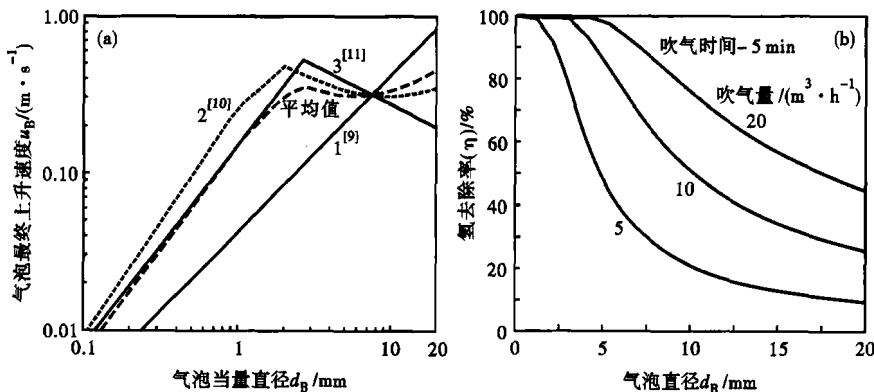


图 1 (a) 不同尺寸的气泡最终上浮速度; (b) 吹气量和气泡直径对氢去除率的影响
Fig. 1 (a) Terminal going up velocity of bubbles with different size; (b) Effect of gas injection rate and bubble size on hydrogen removal rate

$$(2\rho_p - \rho_l)gr_p + 3\left(\frac{2\sigma_{gl}}{r_B} - \frac{\sigma_{sg}}{r_p} + \sigma_{sl}\right) = 0 \quad (10)$$

求解上式,便可得到受力平衡时的夹杂物大小,即气泡所能粘附的最大夹杂物粒径。当夹杂物的直径大于此粒径时,在夹杂物与气泡粘附上浮的过程中,夹杂物将与气泡分离,重新返回至钢液。

表1给出了不同尺寸的气泡可以粘附的最大夹杂物粒径。可以看出,气泡的直径越大,其可粘附的夹杂物的粒径就越大。当气泡的直径为1 mm时,其可粘附的夹杂物最大粒径为210 μm。在实际生产中,钢包吹氩用透气砖的平均孔径一般为2~4 mm,在常用的吹氩流量范围内产生的气泡直径为10~20 mm^[12]。对于10 mm的气泡,其粘附的夹杂物最大粒径可达2.16 mm,而钢液中的夹杂物粒径都远小于此值。故可以认为在钢液中一旦夹杂物与气泡粘附,其在上浮过程中就不会与气泡分离,并最终随气泡上浮至渣层。

表1 气泡粘附夹杂物的最大粒径

Table 1 Maximum diameter of inclusions adhering to bubbles

气泡直径 d_B /mm	夹杂物直径 d_p /mm
1	0.21
5	1.07
10	2.16
20	4.43

2.2 气泡去除夹杂物的效果

为简化起见作如下假设:(1)气泡具有相同的尺寸且在钢液中均匀分布;(2)气泡的尺寸与吹气量大小无关,且在上浮过程中速度保持不变;(3)夹杂物均匀分布在钢液中,且具有相同的尺寸;(4)忽略夹杂物的自由上浮以及夹杂物之间的碰撞长大,仅考虑由于被气泡粘附而去除的夹杂物;(5)不考

虑湍流对气泡夹杂物碰撞的影响。则钢液中夹杂物的去除速度可表示为^[13]:

$$-\frac{dn_t}{dt} = \left(\frac{6Q}{\pi d_B^3} \frac{T_m}{T_0} \frac{1}{V_m}\right) \left(\frac{\pi}{4} d_B^2 H\right) n_t P \quad (11)$$

式(11)中 $\left(\frac{6Q}{\pi d_B^3} \frac{T_m}{T_0} \frac{1}{V_m}\right)$ 表示单位时间内提供给单位体积钢液的气泡个数; $\left(\frac{\pi}{4} d_B^2 H\right)$ 表示单个气泡上浮过程中扫过的钢液体积。其中: n_t - t 时刻单位体积钢液中夹杂物的个数; H -熔池深度; P -夹杂物被气泡捕获的概率。

用 n_0 表示夹杂物在钢液中的初始密度,对式(11)进行积分,可求得 t 时刻夹杂物在钢液中的去除率 η ,其定义式为: $\eta = (n_0 - n_t)/n_0$ (12)

研究表明,当固体颗粒与液体的接触角大于90°时,几乎所有到达气泡表面的固相颗粒都能被气泡粘附^[14]。钢液中常见的脱氧产物为 Al_2O_3 和 SiO_2 ,其与钢液的接触角分别为144°和115°^[15],因此可以认为夹杂物一旦与气泡碰撞就会被其粘附。Yoon等^[16]对固体颗粒和气泡的碰撞进行了研究,得出两者之间的碰撞概率 P 的表达式为:

$$P = \left[\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right] \left(\frac{d_p}{d_B} \right)^2, \quad Re = \frac{u_B d_B \rho_l}{\mu} \quad (13)$$

图3(a)给出了当吹气时间为5 min时,夹杂物在不同吹气量下的去除率。钢液中夹杂物的去除率随吹气量的增大而增大,且夹杂物越大,其去除率越大。对于直径为10 mm的气泡,当吹气量为50 m³/h时,大于50 μm的夹杂物去除率在80%以上。而当吹气量为5 m³/h时,粒径为100 μm的夹杂物去除率仅为48%。因此,在精炼过程中可以通过增

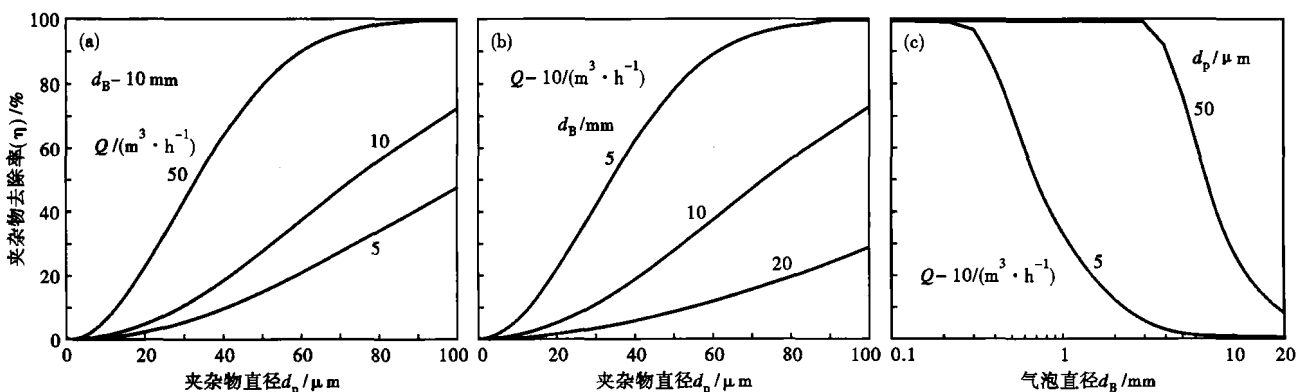


图3 吹气量(a),气泡尺寸(b)和夹杂物大小(c)对夹杂物去除率的影响,吹气5 min

Fig. 3 Effect of gas injection rate (a), bubble size (b) and inclusion size (c) on inclusion removal rate, injection for 5 min

大吹气量的方法来提高夹杂物的去除率,但吹气量不能过大,否则会导致钢渣界面卷渣,污染钢液。

图 3(b)给出了当吹气时间为 5 min 时,在吹气量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 的情况下,气泡大小对夹杂物去除率的影响。从图 3(b)中可以看出,气泡越小,夹杂物越大,夹杂物在钢液中的去除率越高。当气泡直径为 5 mm 时,粒径大于 $60 \mu\text{m}$ 的夹杂物去除率在 80% 以上,而 $40 \mu\text{m}$ 以下的夹杂物去除率却小于 60%;当气泡直径为 10 mm 时, $50 \mu\text{m}$ 以下的夹杂物去除率小于 30%;而当气泡直径增大到 20 mm 时, $100 \mu\text{m}$ 的夹杂物去除率仅为 28%。由此可见,为保证小颗粒夹杂的上浮,气泡的直径应小于 5 mm。

由图 3(c)可以看出,对于 $50 \mu\text{m}$ 的夹杂物,当气泡直径减小到 3 mm 以下时,其去除率可达 100%。而对于 $5 \mu\text{m}$ 的夹杂物,只有当气泡直径减小到 0.4 mm 以下时,夹杂物才能保持较高的去除率。但值得注意的是,当钢液中气泡的直径过小时,其易被卷入钢液的回流中而无法上浮,并最终导致夹杂物不能上浮。因此,为保证钢液中夹杂物的去除率,精炼过程中气泡的直径也不能过小,应大于 1 mm。综合考虑气泡在钢液中的去氢和去夹杂效果,气泡的最优直径应为 1~3 mm。

在实际生产中,多采用多孔透气砖向钢包中鼓入氩气,因此氩气泡的大小主要由透气砖的孔径和吹气量的大小来决定。通过减小吹气量的大小、增

加透气砖的面积或增加透气砖个数都有利于小气泡的产生,且吹气量越小、透气砖孔径越小,产生的气泡就越小^[17]。另外,也可以通过增大钢液搅拌强度的方法来获得此种小气泡,可以将氩气引入具有足够湍流强度的钢液中,依靠湍流波动速度梯度产生的剪切力来将气泡击碎^[18]。

3 结论

(1)在精过程中,小气泡能有效地增大脱气面积,有利于减小钢液中的氢含量。对于小于 3 mm 的气泡,当吹气量大于 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,钢液中的 [H] 基本上能够被完全去除。

(2)夹杂物与气泡粘附上浮是钢液中去除夹杂物的一种有效方式。气泡越大,其可粘附的夹杂物粒径就越大。在钢液中,夹杂物一旦与气泡粘附,其在上浮过程中就不会与气泡分离。

(3)夹杂物在钢液中的去除率与气泡大小、夹杂物大小和吹气量有关。气泡越小、夹杂物越大、吹气量越大,夹杂物就越容易去除。对于 $50 \mu\text{m}$ 的夹杂物,当气泡的直径小于 3 mm 时,其去除率为 100%。

(4)小气泡不仅可以有效地提高钢液的脱气率,还有利于去除钢中的夹杂物。在精炼过程中,钢液中气泡的直径应保持在 1~3 mm。

国家自然科学基金资助项目(60672145)

参考文献

- Mazumdar D, Guthrie R L. The Physical and Mathematical Modeling of Gas Stirred Ladle Systems. *ISIJ International*, 1995, 35(1): 1
- Madan M, Satish D, Mazumdar D. Modeling of Mixing in Ladles Fitted with Dual Plugs. *ISIJ International*, 2005, 45(5): 677
- 顾坤良, 刘浩, 刘沛环. 铝合金熔体微气泡法脱氢的实验研究. *轻金属*, 1993, 18(2): 58
- Zheng Xiaofeng, Hayes Peter C, Lee Hae-Geon. Particle Removal From Liquid Phase using Fine Gas Bubbles. *ISIJ International*, 1997, 31(17): 1091
- 郑淑国, 朱苗勇. 钢包内喷嘴与透气砖吹氩去夹杂水模型研究. *金属学报*, 2006, 42(11): 1143
- 陈维从, 刘浩, 刘沛环. 钢水微气泡精炼脱氢脱氧的研究. *钢铁研究学报*, 1998, 10(1): 10
- 张家芸. 冶金物理化学. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- 郭可切, 高钦, 张国梁. 包内吹惰性气体精炼动力学的研究. *大连理工大学学报*, 1979, 10(3): 122
- Zhang Lifeng, Taniguchi S. Fundamentals of Inclusion Removal From Liquid Steel by Bubble Flotation. *International Materials Reviews*, 2000, 45(2): 59
- Clift R, Grace J R, Weber M E. Bubbles, Drops and Particles. Academic Press, New York, 1978
- Peebles F N, Garber H J. Studies on the Motion of Gas Bubbles in Liquids. *Chemical Engineering and Processing*, 1953, 49: 88
- Wang Laihua, Lee Hae-Geon, Hayes Peter. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal From Molten Steel by Flotation. *ISIJ International*, 1996, 36(1): 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. *金属学报*, 2003, 39(4): 431
- Pan Wei, Uemura Kenichiro, Koyama Shinji. Cold Model Experiment on Entrapment of Inclusions in Steel by Inert Gas Bubbles. *Tetsu-to-Hagané*, 1992, 78(8): 1361
- Cramb A W, Jimbo I. Calculation of Interfacial Tension in Metal-slag Systems. *Steel Research*, 1989: 157
- Yoon R H, Luttrell G H. The Effect of Bubble Size on Fine Particle Flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1989, 5: 101
- 刘红, 解茂昭, 韩景东, 等. 黏性液体中锐孔处气泡的形成. *热科学与技术*, 2005, 4(3): 262
- Evaus G M, Jameson G J, Atkinson B W. Prediction of the Bubble Size Generated by a Plunging Jet Bubble Column. *Chemical Engineering Science*, 1992, 47: 3265

赵晶晶(1986-),女,硕士研究生,精炼、精炼钢液流动、传热的数值模拟。

收稿日期:2009-10-30