

120 t 钢包底吹氩工艺优化水模型研究

张真铭¹ 蔡茜娜¹ 熊辉辉¹ 冯小明² 马鹏² 赖朝彬¹

(1 江西理工大学冶金与化学工程学院, 赣州 341000; 2 新余钢铁有限责任公司, 新余 338001)

摘要 以钢厂 120 t 钢包为研究对象, 对相似原理为基础, 建立几何比例 1:3 的水模型, 通过测定单、双透气砖最低吹氩条件(透气砖位置, 吹气量 0.4~2.0 m³/h 等)对混匀时间的影响, 确定钢包的底吹工艺。实验结果表明, 单孔布置时, 透气砖距离钢包 0.63R (R 为钢包底半径) 时混匀时间最短; 双孔布置时, 增大两透气砖之间的距离有利于缩短混匀时间, 双孔 180° 夹角 0.6R 布置方式效果最好, 混匀时间最短; 在等气量下, 双透气砖效果明显优于单透气砖。

关键词 120 t 钢包 底吹氩 单、双透气砖 吹气量 水模型 混匀时间

A Study on Water Model for Optimum Process of Bottom Blowing Argon of 120 t Ladle

Zhang Zhenming¹, Cai Xi'na¹, Xiong Huihui¹, Feng Xiaoming², Ma Peng² and Lai Chaobin¹

(1 School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000; 2 Xinyu Iron and Steel Co Ltd, Xinyu 338001)

Abstract Based on the principle of similarity, a water model with geometric similarity 1:3 for 120 t ladle in steel is established. The effect of argon conditions of single and double porous brick (porous location, blowing gas rate 0.4~2.0 m³/h, etc) on mixing time to define ladle bottom blowing process parameters has been tested. The experimental results show that with single porous block layout as the porous block layout at bottom 0.63R (R- radius of ladle bottom), the mixing time of liquid is shortest; for double porous block layout, increasing the distance between two porous block is favorable to reduce mixing time, the mixing time of double porous blocks in 180° angle and at 0.6R is shortest; with same gas flow rate, the effect of double porous blocks is obviously better than that of single porous block.

Material Index 120 t Ladle, Bottom Blowing Argon, Single and Double Porous Blocks, Gas Blowing Rate, Water Model, Mixing Time

钢包吹氩技术是一种简单易行而且经济有效的精炼方法, 具有低成本、易操作、安全系数高等优点, 可以有效起到均匀钢水温度和成分, 去除有害气体、夹杂物, 净化钢液、改善钢液质量等作用^[1]。如果吹氩条件不当, 会造成混匀时间长、钢液净化效果差等不良影响。

国内外众多学者对钢包底吹氩进行水模型研究, 研究结果不尽相同。以 70 t 钢包为原型的物理模拟结果表明, 等气量下, 透气砖由一个增加到两个并没有起到改善钢包混匀的效果^[2]; 透气砖位于距离钢包中心 0.76R 时能获得相对最好的钢包混匀时间。对 100 t 钢包底吹氩混匀时间的研究表明, 双透气砖距钢包中心 0.5R 夹角为 180° 时混匀时间较短, 等气量下单透气砖混匀时间稍短于双透气砖^[3]。150 t 钢包物理模拟结果为双透气砖 120° 夹角 0.7R 时混匀时间最短^[4]。单透气砖吹氩时, 透气砖

距离钢包底部中心 0.55R 时混匀时间最短, 等气量下单透气砖和双透气砖的混匀时间相差无几^[5]。

本文以钢厂 120 t RH 钢包为对象进行了钢包底吹氩水模型试验研究, 对吹氩位置、透气砖数量、供气量等影响钢包混匀时间的因素做了考察, 最终提出了优化方案, 为吹氩工艺改进提供了理论依据和指导。

1 实验原理

本实验以相似原理为基础。以相似原理建立模型进行试验时, 需要满足几何相似、动力学相似。对于钢包底吹氩系统来说, 引起体系内流动的动力主要是气泡浮力而不是湍流的粘性力, 因此只要保证模型与原型的修正弗鲁德准数相等, 就能保证动力相似, 根据这一原则, 相似性准数选用修正的弗鲁德常数, 就可以确定模型中供气量的范围^[6-7]。本实验中模型与原型的相似比 $\lambda = 1:3$, 以水代替钢液, 空

气代替氩气。实验参数见表 1。

$$Fr'_m = Fr'_p \quad (1)$$

式中： Fr'_m 、 Fr'_p - 模型和原型的修正弗鲁德准数。

$$\frac{\rho_{g,m} \cdot u_m^2}{\rho_{l,m} \cdot gH_m} = \frac{\rho_{g,p} \cdot u_p^2}{\rho_{l,p} \cdot gH_p} \quad (2)$$

$$\text{特征速度 } u \text{ 为: } u = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (3)$$

由(2)、(3)式可得：

$$Q_m = Q_p \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^5 \cdot \frac{\rho_{g,p}}{\rho_{g,m}} \cdot \frac{\rho_{l,m}}{\rho_{l,p}}} \quad (4)$$

式中： u_m 、 u_p - 钢液、水的流速/ $(m \cdot s^{-1})$ ； $\rho_{g,m}$ 、 $\rho_{g,p}$ 、 $\rho_{l,m}$ 、 $\rho_{l,p}$ - 空气、氩气、水和钢液的密度/ $(kg \cdot m^{-3})$ ； H_m 、 H_p - 模型、原型的熔池深度/ m ； g - 重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$ ； Q_m 、 Q_p - 模型气体体积流量和原型气体体积流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$ 。将表 2 中相关参数带入式(4)中,可求得, $Q_m = 0.0285 Q_p$ 。

2 实验方法

钢包水模型实验装置见图 1,吹气孔布置见图 2。本实验采用刺激响应法,即向钢包内固定位置注入

表 1 钢包原型与模型吹气量

Table 1 Gas blowing rate of prototype and model of ladle

原型流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	模型流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$
14	0.4
21	0.6
28	0.8
35	1.0
42	1.2
49	1.4
56	1.6
63	1.8
70	2.0

表 2 钢包原型与模型主要参数

Table 2 Main parameters of prototype and model of ladle

项目	顶直径/ mm	底直径/ mm	炉深/ mm	气体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	液体密度/ $(kg \cdot m^{-3})$
原型	2 808	2 571	3 423	1.787	7 000
模型	936	857	1 141	1.29	1 000

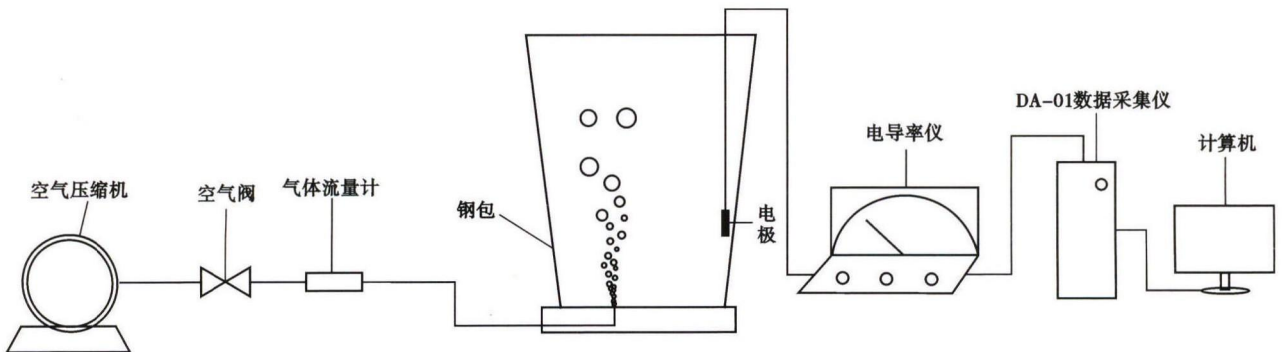


图 1 钢包水模型实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of ladle water model experimental device

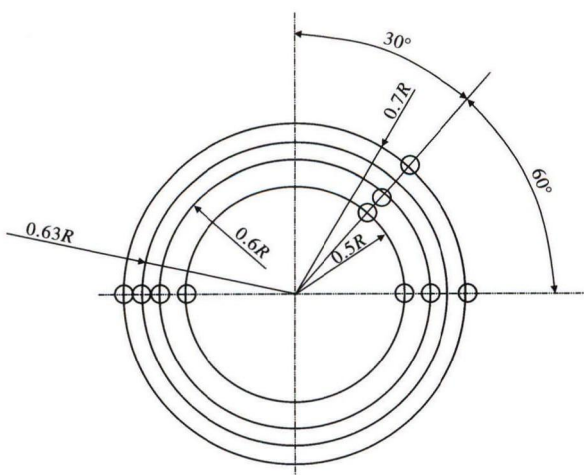


图 2 吹气孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of porous block layout

一定量的饱和食盐水^[8],通过放置在钢包滞留区的 3 个电极探头与 DA-01 数据采集系统记录电导率变化。每组实验测量 3 次,每次测量将 3 个电极探头测出的混匀时间取平均值^[11]。本研究取 $|C_t - C_\infty| \leq 0.05C_\infty$ 为标准,作为其混匀时间 $t_{0.95}$ ^[9-11]。实验方案如表 3 所示。

3 实验结果与分析

3.1 透气砖数量对混匀时间的影响

图 3 为单透气砖吹气下供气量与混匀时间的关系。由图 3 可见,单透气砖吹气时,混匀时间随着供气量的增加而逐渐降低,但当供气量大于 $1.2 m^3/h$ 时,单纯增大供气量,并未对混匀时间造成较大的影响,这是由于当供气量大于 $1.2 m^3/h$ 时,气泡用于

表 3 实验方案和参数
Table 3 Examination schemes and parameters

实验方案	单孔半径/ R	双孔	
		半径/R	角度/°
I	0.5	0.5	60、120、180
II	0.6	0.6	60、120、180
III	0.63		
IV	0.7	0.7	60、120、180

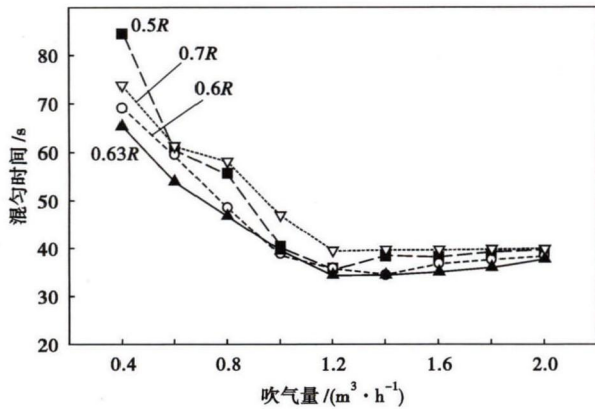


图 3 单透气砖吹气下供气量对混匀时间的影响
Fig. 3 Effect of gas flow rate on mixing time of liquid with single porous block

搅动熔池的能量已达到饱和,其余能量由于液面翻滚而损失,对混匀时间并未造成较大的影响,此外,改变透气砖位置时,上述这一现象仍然存在。

由图 3 可见,在等气量下,透气砖位置对混匀时间有较大的影响。当供气量为单透气砖最优条件下 ($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$),且透气砖距钢包中心位置小于等于 $0.63R$ 时,随着透气砖与钢包中心位置距离的增大,钢包内形成的环流半径逐步增大,混匀时间缓慢减小;当透气砖与钢包中心的距离由 $0.63R$ 增加至 $0.7R$ 时,钢包壁对气流的阻力的影响逐渐大于环流半径的影响,导致混匀时间逐步增大。当透气砖与钢包中心距离达到 $0.7R$ 时,钢包壁阻力对上升气

流的作用明显,致使混匀时间显著增大。因此,钢包内单透气砖底吹时,透气砖的最佳位置为距离钢包中心 $0.63R$ 处,供气量临界值为 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3.2 双透气砖混匀时间

图 4(a)为透气砖呈 60° 夹角时供气量与混匀时间的关系。由图 4(a)可以看出,供气量增大由 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 增大到 $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,混匀时间均呈现减小的趋势;但随着供气量的逐渐增大,混匀时间有逐步增大但是增幅不大。这主要是因为吹入的气体是钢液混匀的能量来源,当供气量较小时,吹入钢包内的气体形成数密度较高的弥散形细小气泡,此时气泡做的功主要用于推动钢液形成环流^[12];随着供气量和气体流速的增大,弥散形细小气泡碰撞长大,形成体积较大的气泡,当供气量超过临界值时,甚至形成气柱,气泡携带的相当一部分能量消耗与液面隆起、翻滚,气泡随之溢出,也带走一部分能量。尽管供气量增加,但其携带的能量用于推动环流的部分增加并不多。从而出现混匀时间减小的幅度明显较小,甚至出现混匀时间随着供气量增大而增大的现象。因此,可确定透气砖夹角为 60° 时,透气砖最佳位置以及供气量为 $0.6R$ 与 $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

图 4(b)为透气砖呈 120° 夹角时供气量与混匀时间的关系。由图 4(b)可见,当透气砖夹角为 120° 、供气量为 $0.4 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,随着供气量的增大,混匀时间整体呈减小的趋势,但是当供气量大于 $1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 后,随着供气量的增加,基本不发生变化。供气量为 $1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,距离钢包中心 $0.5R$ 、 $0.6R$ 、 $0.7R$ 的透气砖组合混匀时间分别为 30.32 、 27.44 、 29.25 s 。因此,可确定透气砖夹角为 120° 时,透气砖最佳位置以及供气量分别为 $0.6R$ 与 $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

图 4(c)为透气砖呈 180° 夹角时供气量与混匀时间的关系。由图 4(c)可以看出,当透气砖夹角为

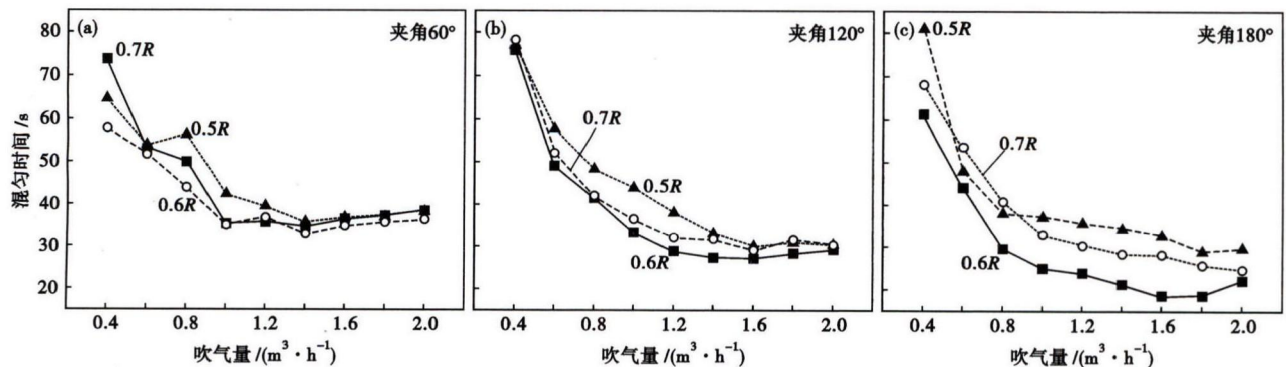


图 4 双吹气孔呈 60° 夹角(a), 120° 夹角(b)和 180° 夹角(c)时供气量对混匀时间的影响
Fig. 4 Effect of gas flow rate on mixing time of liquid with double porous blocks in angle 60° (a), 120° (b) and 180° (c)

180°、供气量为 0.4 ~ 0.8 m³/h 时,混匀时间快速下降;但随着供气量由 0.8 m³/h 增大到 2.0 m³/h 时,混匀时间虽进一步降低但是降幅有所减小。此外,由图 4(c) 还可见,当供气量为 1.6 m³/h 时,距离钢包中心 0.6R 的组合混匀时间达到最小,其值为 18.4 s。

由上述实验可以看出,无论是单透气砖还是双透气砖,供气量均存在一临界值。小于临界值时,混匀时间随供气量增加而减小的幅度较大;大于临界值时,混匀时间减小幅度明显减小,甚至增大。

对比图 4(a, b, c) 可以看出,等气量时,混匀时间随着两孔间距离的增大而减小。这是由于双透气砖形成的两股气流之间存在相互干扰和抵消作用,两透气砖相距越远,在钢包底吹过程中形成的两股气流之间的相互干扰和抵消作用小,流股的能量损失越小;反之,两透气砖之间距离越近,流股的干扰和抵消作用越大,流股之间的能量损失就越大,越不利于搅拌,从而导致损失的混匀时间增加。可见,在采用双透气砖布置时,两透气砖之间相互干扰和抵消而损失的流动能量小,搅拌效果好,钢液和物料混合快。双透气砖情况下,透气砖与钢包中心之间的最佳距离为 0.6R,最佳角度为 180°,供气临界值为 1.6 m³/h。

3.3 单吹与双吹比较

图 5 为单吹与双吹最佳位置条件下不同吹气量对比图。由图 5 可看出,在等气量下,双透气砖组合的混匀时间比单透气砖混匀时间短。这是因为采用单透气砖时,在透气砖上方形成很强的上升气流,气柱附近的液体也被上升的气泡带动,形成强烈的向上流股;但是远离气流的液体,受到气泡运动的影响较小,扰动不活跃,易形成死区,从而造成混匀不均,混匀时间较长的现象。而当采用双透气砖,在钢包内有两股对称的上升气流,形成环流,更有利于混

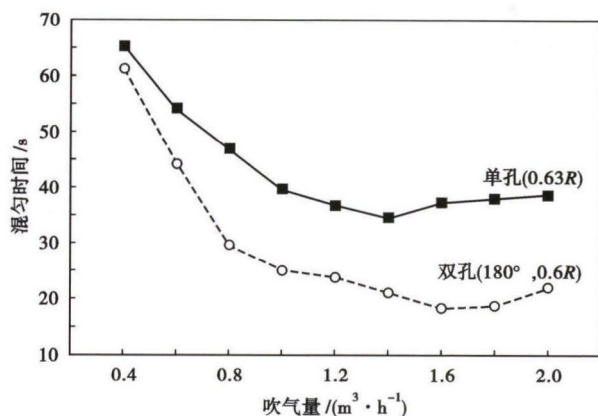


图 5 单吹(0.63R)与双吹(180°, 0.6R)混匀时间比较
Fig. 5 Comparison between mixing time with single porous block (0.63R) and double porous blocks (180°, 0.6R)

匀;同时,在等气量情况下,双透气砖布置中每个透气砖的出气量更小,更容易形成弥散形气泡,从而避免形成气柱,相对于单透气砖布置而言,搅拌更加充分,从而缩短了混匀时间。

4 结论

(1) 不论是单透气砖底吹还是双透气砖底吹,吹气量都存在临界值;供气量小于临界值时,随着吹气量的增加,混匀时间逐渐减小;供气量大于临界值时,随着吹气量的增加,混匀时间反而逐渐增大。

(2) 单透气砖吹气时,透气砖位于距钢包中心 0.63R 时搅拌效果最好,供气量临界值为 1.2 m³/h;双透气砖吹气时,双透气砖 180° 夹角 0.6R 混匀时间最短,供气量临界值为 1.6 m³/h。

(3) 等气量下,双透气砖吹气比单透气砖吹气的混匀效果好。因此,建议采用双透气砖布置,其中双透气砖 180° 夹角 0.6R 混匀效果最佳。

国家自然科学基金项目资助(51464011, 51664021)

参考文献

- [1] 张 鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993.
- [2] 王 杨, 李京社, 张江山, 等. 70 吨钢包底吹氩水模拟分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(2): 51-57.
- [3] 赵青松, 秦 哲, 张明博, 等. 100 t 钢包底吹氩混匀时间与卷渣水模拟[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(6): 128-133.
- [4] 李文双, 朱 荣, 鲍 翔, 等. 150 t 钢包底吹氩的水模型研究[J]. 特殊钢, 2013, 34(3): 18-21.
- [5] 胡道峰, 陈 敏. 南钢精炼钢包吹氩工艺水模实验研究[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(3): 168-171.
- [6] 常国平, 李京社, 唐海燕, 等. 45 t 钢包底吹氩钢液流动的水模型研究[J]. 炼钢, 2010, 26(3): 42-46.
- [7] 阳 方, 沈巧珍, 彭 琦, 等. 100 t 钢包底吹氩工艺优化研究[J]. 过程工程学报, 2010, 10(S1): 108-112.
- [8] Han J W, Heo S H. Transient Fluid Flow Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer-Approach Numerical Simulation and Water Model Experiments[J]. ISIJ International. 2001, 41(10): 1165-1172.
- [9] Jonsson L. Modeling of Fluid Flow Conditions Around the Slag/Metal Interface in a Gas-stirred Ladle [J]. ISIJ International, 1996, 36(9): 1127-1134.
- [10] Pan Y, Bjrkman B. Numerical Analysis on the Similarity Between Steel Ladles and Hot-water Models Regarding Natural Convection Phenomena [J]. ISIJ International, 2002, 42(1): 53-62.
- [11] 倪修华, 张才贵, 周 俐. 250 t 钢包精炼底吹氩吹孔位置优化的水模型试验[J]. 特殊钢, 2013, 34(6): 1-3.
- [12] 徐其言, 朱正海. 250 t 钢包底吹氩吹孔位置优化的水模型实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2013, 30(4): 374-377.

张真铭(1990-), 男, 硕士研究生, 洁净钢研究。E-mail: 15216111389@163.com

收稿日期: 2017-02-11