

120 t 钢包底吹氩工艺水模型研究

周 俐 戴 伟 曹成虎 江新军 何 西

(安徽工业大学冶金与资源学院, 马鞍山 243002)

摘 要 研究了钢厂即将投产的 120 t 钢包底部最佳透气砖位置, 在实验室以 1:3 建立钢包水模型进行模拟试验, 得出最佳透气砖位置及吹气方式。实验表明, 越靠近包壁的透气砖, 其混匀效果越好, 但对包壁的冲刷也越严重。在相同喷吹位置的情况下, 双透气砖方案比单透气砖方案混匀效果好, 且大角度 ($\geq 90^\circ$) 的双透气砖方案比小角度双透气砖方案好。本实验的最佳吹气方案为离包底中心 0.60R (半径) 处, 夹角为 120° 的双孔底吹气方式。

关键词 钢包 底吹氩 搅拌效果 水模型

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

Zhou Li, Dai Wei, Cao Chenghu, Jiang Xinjun and He Xi

(School of Metallurgy and Resources, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002)

Abstract The optimum gas permeable brick position in bottom of 120 t ladle being about to production at steel works has been studied. The established geometric similarity ratio 1:3 water model for the ladle is simulated and tested in laboratory to get the optimum permeable brick position and gas blowing mode. Test results show that the gas permeable brick is nearer to ladle wall, the mixing effect is better but the ladle wall erosion is more serious. With same position condition the mixing effect by using double gas permeable bricks scheme is better than that by using single gas permeable brick scheme and the scheme of double gas permeable brick is with larger angle ($\geq 90^\circ$) is better than that with small angle. The optimum gas blowing scheme in this test is bottom double gas mode with permeable brick at the distance from center of ladle bottom- 0.60R (radius) and angle 120° .

Material Index Ladle, Bottom Argon Blowing, Stirring Effects, Water Model

钢包吹氩技术是一种经济适用并且简单易行的精炼方法, 能有效的均匀钢水温度和成分, 去除有害气体和夹杂物, 改善钢液质量, 因此被广泛应用。但在实际生产操作中, 往往存在因透气砖安装位置的不合理和吹气方式的不恰当而造成钢液二次氧化、包壁侵蚀严重等问题^[1-5]。

本工作对钢厂即将投建的 1 座 120 t 钢包预先进进行模拟研究, 通过物理模拟的方法, 找出底部透气砖最佳布置位置和最优吹气方式。实验表明, 对于小角度的双孔吹气方案, 随着吹气量的逐渐加大, 两气柱容易交缠到一起, 相互影响, 造成流场紊乱, 对混匀时间造成不良影响。

1 实验原理

水模型实验的理论基础是相似原理^[6]。根据相似原理, 模型与原型中流体相似条件是几何相似和动力学相似。对于几何相似, 模型和原型的几何比例可以为任何比例, 本实验模型与原型的几何比例为 1:3; 对于动力学相似, 要求模型和原型中流体的雷诺准数 Re 和弗鲁德准数相等, 但考虑到实验条

件下流体已经处于第二自模化区, 流体的湍流程度及流速的分布几乎不再受 Re 的影响, 因此, 只考虑弗鲁德准数相等。

生产实践中, 使用氩气作为气源, 氩气在钢液中的运动为重力驱动。本实验条件下, 使用空气代替氩气, 必须使用经过修正的准数, 从而换算成工业上的用气量。因此, 保证模型与原型修正的弗鲁德准数相等, 就能保证二者的动力相似^[7]。

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

由公式(1)可以得出:

$$\frac{\rho_{g,m} u_m^2}{\rho_{l,m} g H_m} = \frac{\rho_{g,p} u_p^2}{\rho_{l,p} g H_p} \quad (2)$$

$$\text{特征速度 } u \text{ 可由式(3)给出: } u = 4Q/\pi d^2 \quad (3)$$

则由(1)到(3)可得:

$$c_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \left[\frac{\rho_{g,p}}{\rho_{g,m}} \cdot \frac{\rho_{l,m}}{\rho_{l,p}} \left(\frac{d_m}{d_p} \right)^5 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: m 、 p - 模型、原型; μ_p 、 μ_m - 钢液、水的速度/ $(m \cdot s^{-1})$; $\rho_{l,p}$ 、 $\rho_{l,m}$ 、 $\rho_{g,p}$ 、 $\rho_{g,m}$ - 钢液、水、氩气、空气

的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g -重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); H -熔池深度/ m ; Q -气体流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); d -气体喷嘴直径/ m 。

取相似比为 $\lambda = 1/3 = d_m/d_p$, 氩气、空气、钢液、水的密度分别为 1.7837 、 1.293 、 7.0×10^3 、 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 可以得出 $c_Q = 0.028$ 。

2 实验方法与装置

钢液的混合搅拌效率通常由混匀时间来定义。搅拌能与混匀时间关系式为 $\varepsilon^{-0.4} = \tau/800^{[8]}$ 。因此,可以用混匀时间来间接判断钢液的搅拌能力。其中: ε -平均搅拌能/($\text{W} \cdot \text{t}^{-1}$); τ -混匀时间/ s 。混匀时间越短,钢液搅拌能力越强。

混匀时间采用“刺激-响应”^[3]的实验技术来测定,即向熔池中快速加入一定剂量的示踪剂,同时检测熔池中某一特性,以反映熔池的混匀情况。实验中每次将定量的饱和 NaCl 溶液通过漏斗缓慢注入钢包液面中心点上方,将电极插入钢包底部边缘的滞留区,用电导率仪测量模型中水的电导率变化。另外,本实验中,还在钢包中加入了一定的塑料粒子 ($d < 2 \text{ mm}$, 密度 1.1 kg/m^3), 模拟钢包内合金运动,通过塑料粒子的变化来评价钢包中吹气量对合金运动的影响。实验装置简图见图 1 所示。

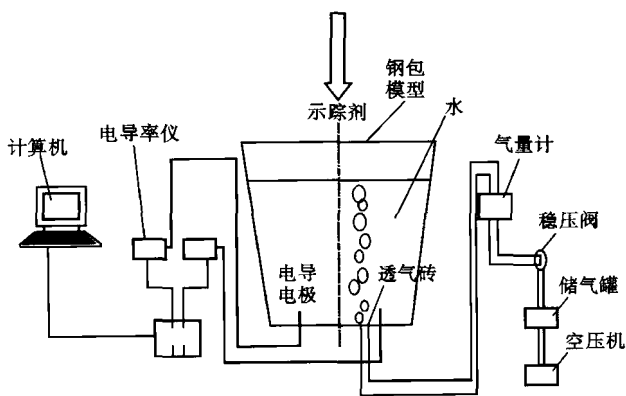


图1 实验装置简图
Fig.1 Schematics of experimental apparatus

3 实验方案

钢包模型在距包底中心 0.30 、 0.40 、 0.50 、 0.55 、 0.60 、 0.70 R (半径) 6 个位置及双透气砖时夹角为 70° 、 90° 、 100° 、 120° 、 140° 5 个角度上一共安装了 12 个透气砖。首先在 6 个位置进行单透气砖实验,然后再对这 6 个位置的按照不同角度方向上进行组合实验。

透气砖布置方案见表 1 所示,实验中透气砖吹气流量方案及其与现场吹气流量的换算见表 2 所示。

表 1 透气砖布置方案
Table 1 Scheme for layout of gas permeable brick

喷孔距包底中心位置	
单孔(半径 R)	双孔(半径 R , 角度 $^\circ$)
0.30	0.30, 70
0.40	0.40, 100
0.50	0.50, 140
0.55	0.55, 90
0.60	0.60, 120
0.70	0.70, 90

表 2 模型和原型透气砖吹气方案
Table 2 Scheme for gas blowing of model and prototype gas permeable brick

吹气量	
模型/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	原型/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
80	48
120	71
200	119
300	179
400	238
500	298
600	357
700	417
800	476
900	536
1 000	595
1 100	655

4 实验结果与分析

4.1 单透气砖模型

试验采用单一透气砖喷吹时,测量钢包的混匀时间(图 2)。由图 2 可见,单透气砖喷吹时,在任何位置,随着吹气量的增加,混匀时间逐渐缩短,但是当供气量达到 800 L/h 左右时,混匀时间几乎不再缩短。

由于钢包底部吹气时,吹入的气体是搅拌能的来源,气泡所作的功主要用于推动液体流动,形成环流,增加供气量可使气泡搅拌能增加,增加环流速度,缩短环流周期,从而使混匀时间缩短。因此增大气体流量能直接增大搅拌功率,促进钢液和物料更快混合。

但是,当供气量超过某一临界值后,相当一部分能量消耗于液面隆起和翻滚,随气-液界面交换能量而损失^[9]。因此,尽管总能量增大,但用于液体环流的能量增加不多,产生的结果是供气量增大,液面的钢液裸露面积增大,混匀时间变化不明显。

同时,在相同流量下,透气砖离中心越远,混匀时间会越短。其原因是偏吹时,液体的循环回路变

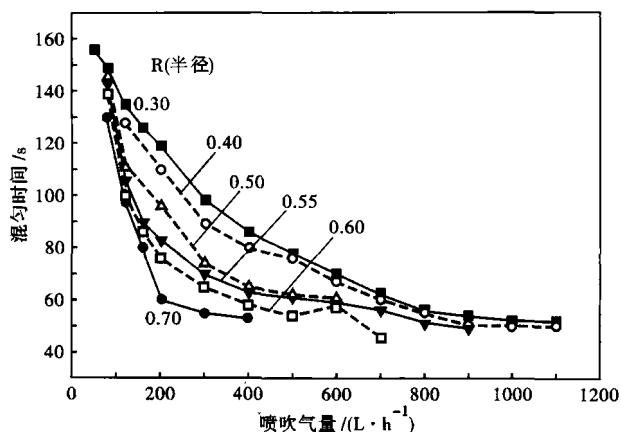


图 2 单透气砖模型混匀时间与吹气量的关系

Fig. 2 Relation between gas flow rate and mixing time for model with single gas permeable brick

长,液体运动的速度梯度减小,速度增大,因而搅拌较好。从实验数据表明,喷吹位置在 0.70 R 时混匀时间最短。

从图 2 中可以发现一个特殊现象,即 0.55、0.60、0.70 R 的混匀时间曲线比 0.30、0.40、0.50 R 的混匀时间曲线短,这是由于喷嘴离包壁越来越近,随着吹气量的逐渐增大,喷嘴喷出的气柱越来越容易冲刷包壁,当气量达到一定程度时,气柱直接冲上包壁,再增大气量已经没有意义^[9]。表 3 记录了不同位置的喷嘴冲刷包壁的临界气量。

4.2 双透气砖模型

由图 3 可见,采用双透气砖进行喷吹时,随着吹气量的增加,混匀时间逐渐缩短。与单透气砖一样,由于增大供气量可使气泡搅拌能增加,从而使混匀时间缩短。当喷吹流量增加到 700 L/h (每个喷嘴的气量)左右后混匀时间几乎不再变化,这一现象产生的原因与单透气砖是相同的。

同时,从图 3(b)中能够发现一个特殊现象,0.30R-70°、0.55R-90°、0.70R-90°的混匀时间曲线比图 3(a)中 0.40R-100°、0.50R-140°、0.60R-120° 双孔吹气方案的曲线要短,且在曲线的最后会反常地出现一个混匀时间突然增加的奇点,这是由于这 3 组双孔吹气方案的夹角均比较小 ($\leq 90^\circ$),随着底吹气量的增大,气柱越来越粗,在水中的距离越来越远,相互影响越来越大,当气

表 3 单孔透气砖冲刷包壁的临界喷气量

Table 3 Critical gas flow rate for single gas permeable brick to erode ladle wall

透气孔距包底中心位置(R)	冲刷包壁临界吹气量/(L·h ⁻¹)
0.55	800
0.60	700
0.70	500

量增大到一定程度时,两道气柱相互吸引,终于交汇在了一处,相互影响,造成大量气泡喷向钢包液面,液面处气泡翻涌,钢包中流场紊乱,从而影响了示踪剂在钢包中的混匀时间,造成混匀时间曲线中出现奇点。

4.3 喷吹气量与钢包中塑料粒子运动的关系

图 4 为气量逐渐增大时气柱演化关系图。

通过单透气砖与双透气砖模型的混匀时间实验,可以发现,随着吹气量的逐渐增大,钢包中形成流场,将平铺在钢包底部区域的塑料粒子卷入水中。气量越大,堆积在钢包底部的塑料粒子逐渐减少,当透气砖喷吹气量达到 600 L/h 的时候,包底塑料粒子基本消失。塑料粒子模拟的是钢中合金的运动,粒子消失代表此时钢包中合金与钢液搅拌充分,此时的吹气量为较好的强搅拌气量,满足工艺现场脱硫的要求。

4.4 优化方案综合分析

通过以上分析,可以从 4 个方面来进行综合考虑,得出最佳吹气方案:

(1) 混匀时间。通过图 2、图 3 的对比,同等吹气条件下,双孔吹气的混匀时间明显比单孔吹气的混匀时间短。同时,从图 2、图 3 中显然能够看出,钢包底部透气孔离包底中心越远,混匀时间越短。

(2) 侧壁冲刷对实验结果的影响。实验中可以

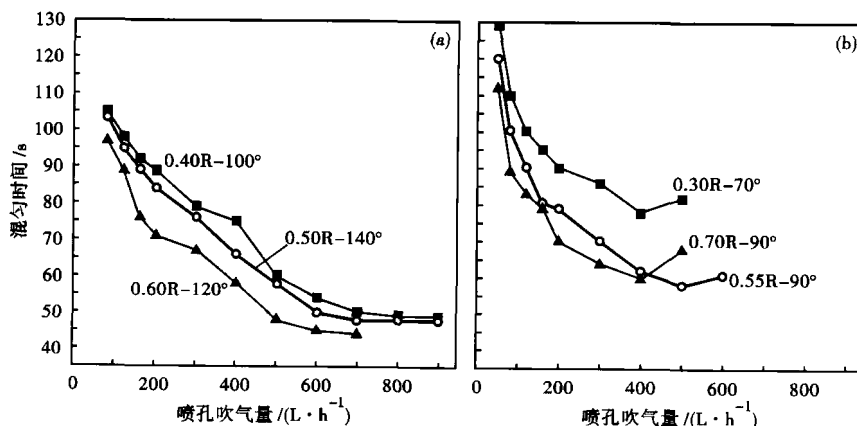


图 3 双透气砖模型混匀时间与吹气量的关系:(a) $\geq 100^\circ$ 角;(b) $\leq 90^\circ$ 角

Fig. 3 Relation between gas flow rate and mixing time for model with double gas permeable bricks with angle $\geq 100^\circ$ (a) and angle $\leq 90^\circ$ (b)

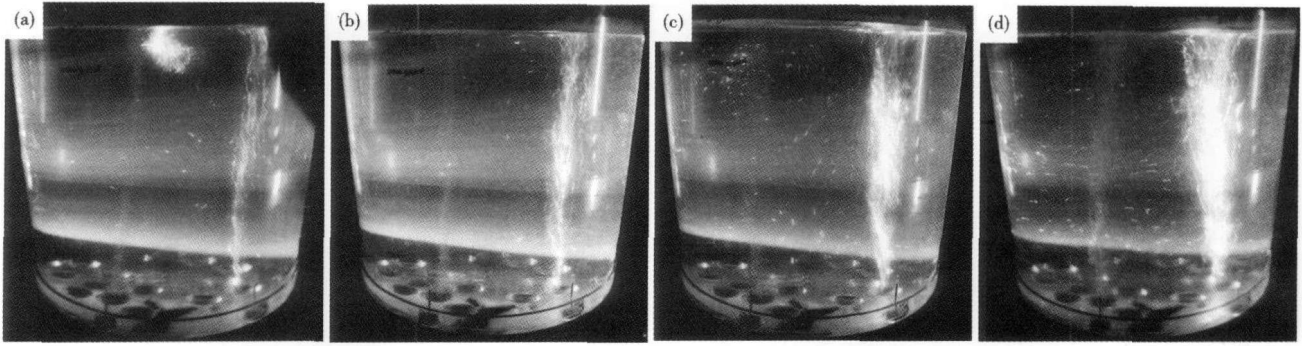


图4 气柱演化关系图:气量由(a)到(d)逐渐增大
Fig.4 Photos of gas column evolution with gas increasing from (a) to (d)

看出,喷吹孔离包底中心越远,喷吹气柱就会离包壁越近,随着底吹气量的增加,容易产生气柱冲刷上部包壁的现象。

(3)双吹喷孔角度影响。双孔喷吹时,应选择夹角较大的双孔吹气方案,夹角过小,两喷孔喷出的气柱容易在水中相交,相互影响,造成流场紊乱,影响搅拌效果,延长混匀时间。

(4)喷吹气量对钢包底部死区的影响。由于600 L/h是较好的强搅拌气量,对于所有实验方案,应当保证在吹气量为600 L/h的时候,透气砖供气正常,不会发生气柱冲刷包壁等不利于钢包精炼的现象。

综合以上4点,应选择夹角较大、离包底中心较远的双孔吹气方案,但0.70R-90°双孔吹气并不是最佳吹气方案,因为此双孔吹气方案的夹角过小,不满足上面第(3)条,并且在此方案下,当喷孔吹气量达到600 L/h时,会产生气柱冲刷包壁现象,不满足上面第(2)、第(4)条。

在舍弃单孔吹气方案、小角度双孔吹气方案以及与0.70R相关的方案后,将剩下的方案进行对比(图3b)。在同等吹气量下,0.60R-120°方案的混匀时间是最短的,并且满足上面所有条件。因此0.60R-120°方案为最佳吹气方案。

5 结论

(1)底吹搅拌时,在一定范围内,增大气流量有利于缩短混匀时间。但当供气量过大时,相当一部分能量消耗于液面的隆起和翻滚,随气-液界面交换能量而损失。因此,当超过某一临界值后,供气量增大,混匀时间变化不明显。透气砖位置离包底中心越远,随着喷吹气量的增加,越容易产生冲刷包壁现

象。即喷孔越靠近包壁,越容易冲刷包壁。

(2)在相同的吹气量下,双透气砖喷吹因将气体分由两个位置喷出,搅拌效果比单孔喷吹好,其混匀时间较短。在双孔喷吹时,大角度喷吹比较不容易产生两气柱交缠合并的现象,比小角度喷吹的效果好。

(3)综合考虑,钢包底吹氩精炼过程中,要在最佳的气流量下达到最短的混合时间以及最大的外加合金利用率,宜采用双透气砖喷吹模式,透气砖布置方式为0.60R-120°。

国家科技支撑计划项目资助(2007BAE30B01)

参考文献

- 1 艾新港,包燕平,吴华杰. 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究. 特殊钢,2009,30(2):7
- 2 任三兵,陈义盛. 大型钢包双孔吹氩最佳位置的探讨. 包头钢铁学院学报,2003,22(3):193
- 3 李建科,刘继武. 钢包底吹氩水模实验研究. 山东冶金,2008,30(1):47
- 4 巨建涛,杜俊峰. 60 t LF 炉底吹氩的水模研究. 四川冶金,2005,27(3):1
- 5 黄宗泽,任三兵,陈义盛. 宝钢300 t LF 物理模拟的实验研究. 宝钢技术,2004(5):47
- 6 Sahay S K, De T K, Basu D S, et al. Stranc Performance Improvement Through Use of Asymmetric Baffles in Tundish of Six Strand Billet Caster at DSP. Iron and Steel,2001(7):71
- 7 朱苗勇,肖泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京:冶金工业出版社,1998
- 8 Nakanishi K, Fujii T, Szekeley J. Possible Relationship Between Energy Dissipation and Agitation in Steel Processing Operations. Ironmaking Steelmaking,1975,2(4):193
- 9 阳方,沈巧珍,彭琦. 100 t 钢包底吹氩工艺优化研究. 过程工程学报,2010,1(10):109

周 俐(1963-),女,教授,冶金理论与工艺研究。

收稿日期:2011-12-14