

LCAK 钢 CAS 精炼过程的物理模拟

马文俊^{1 2)}✉ 包燕平^{1 2)} 崔衡^{1 2)} 苑品^{1 2)}

1) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: mawenjun2929@163.com

摘要 针对 CAS 精炼过程中罩外有大量气泡溢出的问题, 在相似性原理的基础上建立了 CAS 钢包的水模型. 研究了 CAS 精炼过程中底吹气量、浸渍罩插入深度和不同底吹位置对钢包混匀时间的影响. 实验发现: 浸渍罩的中心与底吹气孔的中心同轴时, 能有效地防止罩外气泡溢出. 对于 300 t 钢包, 底吹方案优化后, 底吹位置选在距钢包中心 $0.3r \sim 0.4r$ (r 为钢包底部半径) 精炼时底吹气量为 $600 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 排渣时底吹气量选在 $500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右, 浸渍罩浸入深度选为 $180 \sim 225 \text{ mm}$. 工业试验表明, 优化后的底吹方案有效地解决了罩外气泡溢出的问题, 并且提高了 LCAK 钢液的洁净度和可浇注性.

关键词 精炼; 模拟; 排渣; 工业试验

分类号 TF 769.2

Physical modeling of CAS refining processes for LCAK steel

MA Wen-jun^{1 2)}✉, BAO Yan-ping^{1 2)}, CUI Heng^{1 2)}, YUAN Pin^{1 2)}

1) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

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

✉Corresponding author, E-mail: mawenjun2929@163.com

ABSTRACT Based on the similarity principle, a water model was established for the problem that a large number of bubbles overflow from the submerged tube in the CAS process. The effects of the flow rate of bottom gas, the submerging depth of the submerged tube and the nozzle position on the mixing behavior of liquid steel were studied. It is found that the problem of bubble escaping can be resolved when the hood center and the bottom nozzle center are coaxial. For a 300 t ladle, the optimal bottom blowing process was obtained. The optimal position of bubbling is $0.3r$ to $0.4r$ (r is the ladle bottom radius) away from the ladle bottom center, the flow rate of bottom blowing is approximately $600 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ in the refining process and $500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ in the deslagging process, and the immersion depth of the submerged tube is 180 to 225 mm. Industrial tests show that the improved bottom blowing process can effectively prevent bubbles from overflowing, and improve the cleanliness and castability of the LCAK steel.

KEY WORDS refining; modeling; deslagging; industrial test

影响 CAS (composition adjustment by sealed argon bubbling) 精炼工艺混匀效果的主要因素有底吹位置、底吹气量和浸渍罩浸入深度. 在降罩前, 底吹 Ar 气排开的裸露钢液面积直接影响降罩后残留在罩内的渣量, 从而影响 CAS 精炼工艺效果^[1-3]. 首钢京唐公司 300 t 钢包 CAS 精炼过程中, 底吹气体溢出浸渍罩外导致卷渣, 影响钢液洁净度和可浇注性, 尤其在 LCAK 钢的穿插冶炼浇次中, CAS 供钢水的可浇性较差, 出现水口堵塞导致更换水口的频率高, 而且拉速波动较大, 严重影响生产顺行.

针对以上问题在实验室结合现场实际情况展开了物理模拟实验. 本文以现场 300 t CAS 炉为原型, 对 CAS 精炼效果的主要影响因素进行了深入研究. 利用物理模拟实验结果进行了工业验证, 根据工业试验效果对现场 CAS 工艺进行改进.

1 实验原理

1.1 何相似

模型按几何相似比 (模型与原型的几何比例) $\lambda = 1/4.5$ 制作. 原型与模型的有关尺寸见表 1.

表 1 钢包原型和模型尺寸
Table 1 Size of the prototype ladle and physical model

钢包	钢包上口直径	钢包下口直径	钢包高度	熔池深度	渣层厚度	浸渍罩内径	浸渍罩外径	透气砖直径
原型	4007	3642	4400	4016	100.0	1676.0	2200.0	132.0
模型	890	809	978	892	22.2	372.4	488.9	29.3

1.2 动力学相似

对于 CAS 精炼钢包系统来说,系统的主要动力来源于底吹气泡的浮力,钢液流动和物理模拟实验过程中水的运动都处于第二自模化区,因此在 CAS 水模型研究过程中,保证模型与原型的修正弗劳德准数相等,即能满足动力学相似^[4]. 通过修正弗劳德准数,得出

$$Q_m = 0.0118 Q_{real} \quad (1)$$

式中 Q_m 为实验过程中常温常压下气体流量, Q_{real} 为现场生产过程中常温常压下气体流量. 表 2 为对应的气体流量关系.

表 2 原型和模型底吹流量

Table 2 Flow rate of bottom blowing of the prototype ladle and physical model

原型底吹流量 / (L·min ⁻¹)	300	400	500	600	700	800
模型底吹流量 / (m ³ ·h ⁻¹)	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56

1.3 模拟介质的选择

实验中采用水模拟钢液,用底吹 N₂ 模拟原型底吹 Ar. 排渣时,用混合机油模拟熔渣,混合机油应满足如下条件^[5-6]:

$$\frac{v_{sl}}{v_{st}} = \frac{v_{油}}{v_{水}} \quad (2)$$

式中 v_{sl} 、 v_{st} 、 $v_{油}$ 和 $v_{水}$ 分别表示渣、钢液、油和水的运动黏度, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 选择满足式(2)的油来模拟,以保证钢-渣界面与水-油界面相似性.

2 实验方法

本实验在研究 CAS 精炼过程中的主要影响因素时,采用“刺激-响应”实验. 本实验采用电解质跟踪法测定混匀时间,饱和 NaCl 溶液作示踪剂,每次实验加 200 mL. 示踪剂注入时刻为混匀时间的起点,在反应器的滞留区内的三点,使用电导电极进行示踪剂的浓度采集. 稳定值上下波动不超过 5% 的时刻为混匀时间的终点^[7-10]. 三个监测点中以混匀时间最长的点定为系统的混匀时间. 为了消除外界

因素的影响和系统误差,重复三次求平均值作为最终的混匀时间.

在进行排渣物理模拟实验时,以 1 kW 的新闻灯作光源,用高清摄像机记录“油-水”界面流动情况,并测量和记录渣眼半径. 实验装置如图 1 所示.

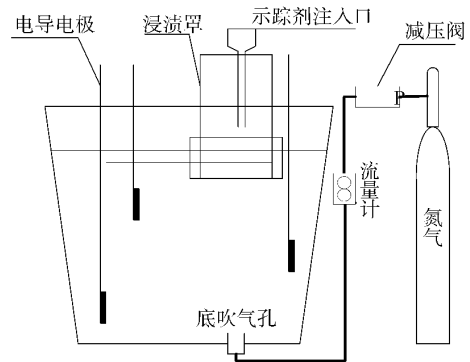


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental device

3 实验结果及分析

3.1 底吹透气砖位置的优化

3.1.1 模拟现场底吹透气砖位置

按现场底吹透气砖的位置在水模型上做物理模拟实验. 现场钢包的底吹气孔与浸渍罩中心不同轴,距包底圆心 $0.43r$ (r 为包底半径),钢包底部如图 2 所示. 现场底吹气量为 $700 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ (对应模型 $0.49 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$),现场浸渍罩浸入深度为 225 mm (对应模型 50 mm).

实验过程中观察发现,在现有的方案下,有大量气泡溢出浸渍罩外,罩外液面波动很严重,从而导致卷渣,使钢的质量下降. 甚至底吹气量降到 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,仍有大量气泡溢出,这与生产中所遇到的问题相似,因此有必要对现有的方案进行优化.

3.1.2 优化底吹位置

在与原型相同的浸入深度 (50 mm),底吹位置分别选择在 $0.0r$ 、 $0.1r$ 、 $0.2r$ 、 $0.3r$ 和 $0.4r$ 处,在 0.35 、 0.42 和 $0.49 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的底吹气量下,保证与浸渍罩中心同轴,实验结果如图 3 所示.

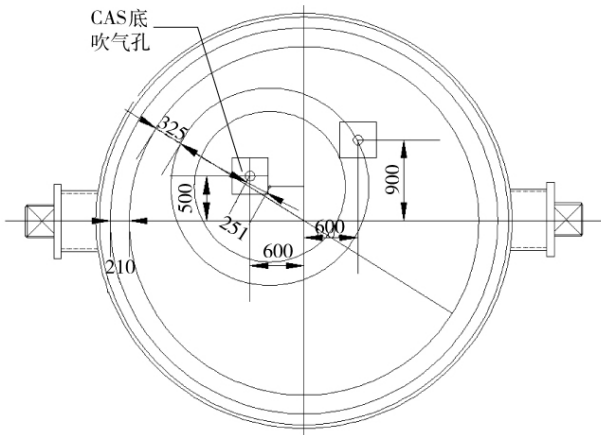


图 2 钢包原型底部尺寸示意图(单位: mm)
Fig.2 Schematic of the prototype ladle bottom (unit: mm)

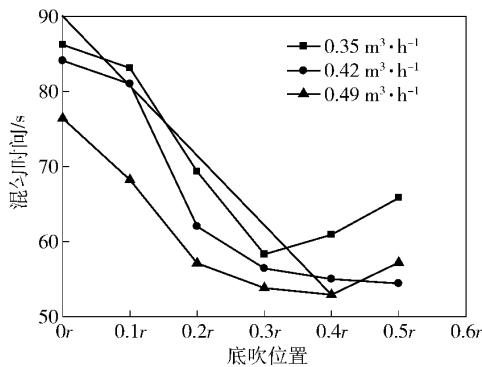


图 3 不同底吹气量下底吹位置对混匀时间的影响
Fig.3 Effect of bottom-blowing location on mixing time at different gas rates

随着底吹位置与包底中心距离增大,混匀时间明显减小.当大于 0.4r 后,底吹位置太靠近包壁,无法满足与浸渍罩同轴,底吹气体容易溢出罩外,上升气流的能量损失于液面波动,未作用于钢液环流,如同现场位置.从图 3 看出,最佳的底吹位置为 0.4r 左右;但在现场底吹孔选在这个位置时,若钢包壁结瘤,降罩时会有碰壁的危险,所以底吹位置选在相对次优位置 0.3r 处.

3.2 底吹气量和浸渍罩浸入深度的优化

为研究底吹气量对混匀时间的影响,底吹位置定在 0.3r 处,在浸渍罩不同浸入深度下分别测定不同底吹气量下的混匀时间,结果如图 4 所示.

从以上实验结果可以看出,底吹气量与混匀时间的关系曲线存在一个临界点(0.49 m³·h⁻¹).底吹气量小于临界气量时,随气量的增大,混匀时间在减小;底吹气量大于临界气量时,混匀时间随气量的增大而增大.这跟底吹气体的能量利用率有关.当底吹气量小于临界气量时,气泡在液体内为弥散气泡,气泡浮力所做的功主要用于液体环流,气量越

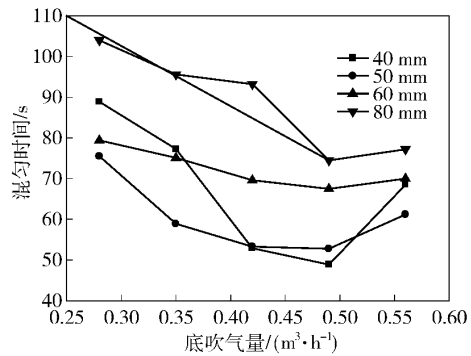


图 4 不同浸入深度下底吹气量对混匀时间的影响
Fig.4 Effect of gas rate on mixing time at different depths

大推动环流所做的功越多,混匀时间减小;底吹气量大于临界气量时,气柱偏移,气泡溢出罩外,气泡所做的功一部分损失于罩外液面波动,所以对液体环流所做的功不一定增加,混匀时间不一定减小.可见底吹气量应取在 0.42 ~ 0.49 m³·h⁻¹ 之间.

由图 4 可以看出,底吹气量在 0.42 ~ 0.49 m³·h⁻¹ 之间,浸渍罩浸入深度为 40 mm 和 50 mm 时,混匀时间明显减小,混匀效果明显优于其他浸入深度时的混匀效果.所以综合底吹气量优化的结果,浸渍罩浸入深度应选在 40 ~ 50 mm,现场选 180 ~ 225 mm.

3.3 排渣时底吹气量的优化

为研究不同顶渣层厚度下,不同底吹气量的排渣能力,选 0.21、0.28、0.35、0.42、0.49 和 0.56 m³·h⁻¹ 六个不同的底吹气量,渣层的厚度定为 10、15、18 和 22 mm(相应地,现场定为 45、68、80 和 100 mm) 四个值.根据底吹位置优化的实验结果,底吹位置定在 0.3r 处.用宽尺测量底吹时混合油面裸露出水面的直径即排渣直径 D.实验结果如图 5 所示.

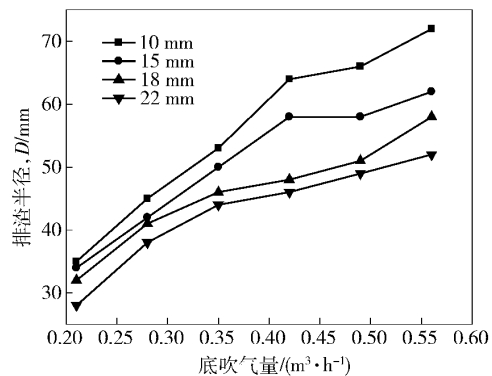


图 5 渣层厚度和底吹气量对排渣半径的影响
Fig.5 Effect of slag thickness and gas rate on deslagging radius

由图 5 可知,同一渣层厚度时,排渣直径随底吹

气量增大而增大. 底吹气量增大到一定程度时,排渣直径增大的趋势有所减缓. 在同一底吹气量下,排渣直径随渣层厚度的增加而减小.

实验中还可观察到底吹气量为 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,渣层厚度为 10 和 15 mm 时无卷渣现象,当渣层厚度为 18 和 22 mm 时有卷渣现象. 底吹气量大于 $0.42 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时各个渣层厚度都有卷渣现象,并且在同一底吹气量下,随着渣层厚度的增加卷渣现象也越严重. 渣层厚度为 10 和 15 mm 时,底吹气量超过 $0.49 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 后,其自由表面的水平流将严重地冲刷钢包的渣线部位,加速钢包壁渣线部位耐材的侵蚀. 其次排渣直径较大时,暴露在空气中的钢液将在底吹气流的影响下严重氧化,同时易造成卷渣. 所以在现场顶渣厚度为 100 mm (模型 22 mm) 和浸渍罩直径一定的条件下,应选择合适的排渣底吹气量. 综合现场的渣厚和罩径,现场排渣时底吹气量应选在 $500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右.

4 工业试验

通过水模型实验优化结果,对该厂 300 t 钢包

CAS 精炼工艺作了如下改进:排渣时底吹气量应控制在 $500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右;精炼时底吹气量应控制在 $600 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右;底吹位置选在 $0.3r$ 处;浸渍罩浸入深度为 180 ~ 225 mm. 现场渣量是一定的,渣层厚度为 100 mm. 表 3 为优化前后 CAS 精炼参数的对比.

表 3 优化前后 CAS 精炼主要参数

Table 3 Main parameters of CAS process before and after optimization

工况	底吹气量 / ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)		底吹位置	浸渍罩浸入深度 / mm
	排渣	精炼		
优化前	500	500	$0.43r$	200
优化后	500	600	$0.3r$	180 ~ 225

该厂按以上方案对钢包进行了改进,结果表明:该厂之前存在的 LCAK 钢 CAS 精炼过程罩外有大量气泡溢出的问题已得到解决,并且底吹效果是影响 CAS 冶炼 LCAK 钢洁净度的一个因素. 为分析钢包底吹砖改造对 LCAK 钢可浇性的改善效果,对改造前后 LCAK 钢所采用的不同的精炼方式所占的比例以及浸入式水口消耗情况进行了统计,结果见表 4 和表 5.

表 4 优化前后 LCAK 钢所采用的不同精炼方式所占的比例

Table 4 Proportion of different refining modes of LCAK steel before and after optimization

工况	CAS	LF	RH	其他	生产时间
改造前	23.8% (127 炉)	62.6% (333 炉)	12.4% (66 炉)	1.2% (8 炉)	2010-07-01—2010-07-31
改造后	41.5% (278 炉)	42.5% (285 炉)	14.7% (99 炉)	1.3% (9 炉)	2010-09-01—2010-09-30

表 5 优化前后冶炼 LCAK 钢水口消耗对比

Table 5 Consumption of nozzle clogging in LCAK smelting before and after optimization

工况	CAS 精炼炉数	CAS 供钢水炉次水口消耗数	CAS 每炉消耗水口数	水口消耗指数
改造前	127	73	0.58	2.44
改造后	278	158	0.57	1.37

由表 4 中的统计数据可知,对钢包底吹进行改造后,采用 CAS 精炼方式的比例上升了 17.7%,LF 的比例下降了 20.1%,RH 的比例上升了 2.3%. 改造前常出现的整浇次 LF 冶炼 LCAK 钢的情况在改造后也非常少见,多为 CAS、RH 和 LF 穿插冶炼,并且 LF 精炼的比例明显下降. 由表 6 可以看出对钢包底吹改造后,冶炼 LCAK 钢通过 CAS 精炼的钢水开机比例从 16.3% 上升到了 31.9%.

为了剥离 LF 精炼比例对 CAS 冶炼 LCAK 钢的影响,引入水口消耗指数 α ,

$$\alpha = \frac{\text{CAS 钢水每炉消耗水口数}}{\text{CAS 精炼比}} = \frac{\text{CAS 供钢水水口消耗数}}{\frac{\text{CAS 精炼炉数}}{\text{CAS 精炼炉数}} \cdot \text{总炉数}} \quad (3)$$

由表 5 知,改造后水口消耗指数从 2.44 下降到 1.37. 改造前采用 LF 精炼的比例较高,改造后采用 CAS 精炼的比例上升,而 LF 工艺供钢水的可浇性较好,水口消耗指数的下降表明通过对钢包底吹的改进,CAS 供钢水的水口消耗有所改善,同时也说明改造后 CAS 供钢水的可浇性有一定提高.

表 6 优化前后 CAS 精炼方式开机比例

Table 6 Rate of CAS free-opening before and after optimization

工况	浇次样本量	CAS 开机比例 / %
改造前	55	16.3
改造后	64	35.9

5 结论

(1) 在 CAS 精炼时, 保证浸渍罩中心与底吹孔同轴, 能有效防止罩外气泡逸出。在 $0.4r$ 左右时混匀效果最佳; 同一渣层厚度时, 排渣直径随底吹气量增大而增大; 底吹气量和渣层厚度越大, 越容易导致卷渣。

(2) 根据实验结果并结合现场实际情况, 最优底吹位置选在 $0.3r \sim 0.4r$, 精炼时底吹气量应控制在 $600 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右, 浸入深度应控制在 $180 \sim 225 \text{ mm}$ 范围内, 排渣时底吹气量应控制在 $500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右。

(3) 优化后 CAS 精炼工艺方案, 在 LCAK 钢的 CAS 精炼过程有效防止罩外气泡逸出, 防止卷渣, 提高了底吹气流能量的利用率, 促进了夹杂物去除, 提高了洁净度, 从而减少了中间包水口堵塞发生率, 增加了连铸连浇炉次。优化后 CAS 精炼方式开机的比例从 16.3% 上升到 35.9% 。

参 考 文 献

- [1] Yin H B. CAS ladle refining process and its developing trend. *Iron Steel*, 1994, 29(11): 73
(尹弘斌. CAS 钢包精炼法及其发展趋势. 钢铁, 1994, 29(11): 73)
- [2] Chang G P, Li J S, Tang H Y, et al. Water modeling on fluid flow in a 45 t ladle with bottom argon blowing process. *Steelmaking*, 2010, 26(3): 42
(常国平, 李京社, 唐海燕, 等. 45 t 钢包底吹氩钢液流动的水模拟研究. 炼钢, 2006, 26(3): 42)
- [3] Ha C S, Park J M. Start-up and some experience of CAS-OB at POSCO. *Arch Metall Mater*, 2008, 53(2): 637
- [4] Wang J J, Bao Y P, Qu Y. *Tundish Metallurgy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001
(王建军, 包燕平, 曲英. 中间包冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 2001)
- [5] Nakanishi K, Fujii T, Szekely J. Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel processing operations. *Ironmaking Steelmaking*, 1975, 2(3): 193
- [6] Jonsson L, Jonsson P. Modeling of fluid flow conditions around the slag/metal interface in a gas-stirred ladle. *ISIJ Int*, 1996, 36(9): 1127
- [7] Jin Y L, Bao Y P, Yue F, et al. Water model study on mixing time in a 210 t ladle in the CAS process. *Steelmaking*, 2007, 23(6): 36
(金友林, 包燕平, 岳峰, 等. 210 t 钢包 CAS 精炼混匀时间的水模型实验研究. 炼钢, 2007, 23(6): 36)
- [8] Shen Q Z, Yang F, Peng Q, et al. Study of stirring effect and inclusion removal in 230 t ladle by water model. *J Wuhan Univ Sci Technol*, 2010, 33(1): 1
(沈巧珍, 阳方, 彭琦, 等. 230 t 钢包搅拌效果和去夹杂水模型研究. 武汉科技大学学报, 2010, 33(1): 1)
- [9] Pan Y H, Björkman B. Numerical analysis on the similarity between steel ladles and hot-water models regarding natural convection phenomena. *ISIJ Int*, 2002, 42(1): 53
- [10] Han J W, Heo S H, Kam D H, et al. Transient fluid flow phenomena in a gas-stirred liquid bath with top oil layer—approach numerical simulation and water model experiments. *ISIJ Int*, 2001, 41(10): 1165