100 t 钢包底吹氩混匀时间与卷渣水模拟

赵青松[1,2]，秦 哲[2]，张明博[2]，乔 智[2]，仇圣桃[2]，赖朝彬[1]

(1. 江西理工大学冶金与化学工程学院，江西 赣州 341000；2. 中国钢研科技集团有限公司中达连铸技术国家工程研究中心，北京 100081)

摘 要： 基于相似原理，按照 1∶4 对某钢厂 100 t 底吹氩钢包建立水模型，研究不同底吹位置、吹氩流量对混匀时间和卷渣行为的影响。研究表明：单喷嘴底吹氩，喷嘴位于钢包底部中心 0.5R(钢包半径)至 0.65R 位置时的混匀时间较短；双喷嘴距钢包底部中心 0.5R，夹角为 180°时的混匀时间较短；相同流量下，单吹混匀时间稍低于双吹；为减轻包壁的侵蚀，喷嘴距包底中心距离最好小于 0.65R。在试验条件下得出的最佳吹氩流量是 426 L/min，单吹临界卷渣流量为 142 L/min，双吹临界卷渣流量为 213 L/min，有利于渣钢界面反应的流量应大于 284 L/min。

关键词： 钢包；底吹氩；混匀时间；临界卷渣；水模型

中图分类号： TF769　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1004-7638(2015)06-0128-06

DOI： 10.7513/j.issn.1004-7638.2015.06.024

Water Simulation on Mixing Time and Slag Entrapment for a 100 t Ladle

Zhao Qingsong[1,2], Qin Zhe[2], Zhang Mingbo[2], Qiao Zhi[2], Qiu Shengtao[2], Lai Chaobin[1]

(1. School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. National Engineering and Research Center of Continuous Casting Technology, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on similarity theory, the 1∶4 water model was established for a 100 t ladle in a steel plant, the effect of different positions of bottom nozzle and gas flow-rate on mixing time and slag entrapment was studied by water model experiments. The results showed the mixing time for single nozzle was short when nozzle location distance from center of ladle bottom was between 0.5R and 0.65R; the mixing time was short for double nozzles with location 0.5R and angle of 180°. The mixing time with single nozzle blowing was a little shorter than that of double nozzles blowing when gas flow-rate was same. In order to reduce wall erosion, the nozzle distance from the center of the bottom of ladle should be less than 0.65R. It was concluded that the best blowing argon flow under this experimental condition was 426 L/min, the critical entrapped slag flow was 142 L/min for single nozzle, while 213 L/min for double nozzles, the flow benefitting steel slag interface reaction should be more than 284 L/min.

Key words: ladle, bottom argon blowing, mixing time, critical entrapped slag, water model

0 引言

钢包吹氩搅拌是炉外精炼的重要手段，这种方法的优点是均匀钢水温度、成分和去除夹杂物效果好。但如果吹氩条件控制不当，会影响混合搅拌效率，吹氩量过大会导致卷渣，底吹位置不当会造成包壁冲刷，影响钢包寿命。因此，研究吹氩条件下钢包内流体的混合特性、渣金卷混行为具有重要的生产指导意义。周俐[1]、阳方[2]等人的水模研究表明透气元件越靠近包壁，混匀时间越短。钟良才[3]认为

收稿日期： 2015-04-24

作者简介： 赵青松(1987—)，男，江苏沛县人，在读硕士研究生，主要从事炉外精炼工艺的研究。

靠近包壁布置的透气砖不利于底吹气体搅拌钢液，喷吹夹角较小的双透气砖比夹角较大的双透气砖搅拌效果好。林晓川[4]认为吹氩孔设在半径的 0.618 处，夹角 135°时的混匀效果最为理想。曹震等人[5]针对 100 t 钢包卷渣行为的模拟得出单孔临界卷渣流量为 450 L/min。郑万等人模拟 250 t 钢包卷渣行为得出临界卷渣流量为 69 m^3/h[5]。现有的研究结果表明不同钢包吨位、不同试验条件下得出的结果不同，甚至有的差异很大。

笔者对某钢厂 100 t 底吹氩钢包进行了水模试验，考察了底位置、底吹氩量对精炼过程钢液混匀效果以及卷渣行为的影响，最终提出了优化措施，为现场吹氩工艺改进提供理论依据和指导。

1　试验原理

1.1　几何相似

几何相似考虑的是物理模型与原型尺寸的相似，本试验的物理模型是水模型，用有机玻璃制成圆形容器来模拟钢包，用水模拟钢水，用氮气模拟氩气，它们的几何相似主要指的是 D/H(钢包内径/熔池深度) 相等，模拟按几何相似比(模型与原型的几何比例) $\lambda=1/4$ 制作。原型与模型的有关尺寸见表 1，钢包底部喷嘴设计如图 1 所示，喷嘴根据现场透气元件设计为多孔状。喷嘴位置位于距钢包中心 $0.4R$、$0.5R$、$0.55R$、$0.6R$、$0.65R$、$0.7R$ 处，其中现场单吹位置距中心 $0.55R$，双吹试验设置夹角分别为 90°、120°、180°，喷嘴布置方案见表 2。

表 1　钢包原型与模型主要参数

Table1　Main parameters of prototype and model

	几何参数/mm					物理参数/(kg·m^{-3})	
对象	钢包上口直径	钢包下底直径	钢包高度	熔池深度	喷嘴直径	液体密度	气体密度
原型	3 290	2 540	3 460	2 660	110	7 000	1.78
模型	823	635	865	665	28	1 000	1.25

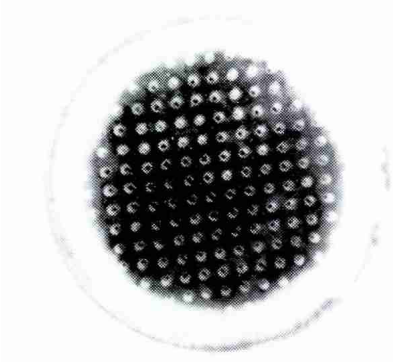


图 1　喷嘴模型

Fig. 1　Nozzle model

表 2　单喷嘴与双喷嘴位置布置方案(喷嘴距包底中心位置)

Table 2　Location arrangement of single nozzle and double nozzles

单孔半径 R	双孔	
	半径 R	角度/(°)
0.4	0.4、0.4	90、120、180
0.5	0.5、0.5	90、120、180
0.55		
0.6	0.6、0.6	90、120、180
0.65		
0.7		

1.2　动力学相似

对于 LF 钢包吹气精炼系统来说，引起体系流动的动力主要是气泡浮力而不是湍流的黏性力，钢液流动和物理模拟试验过程中水的运动都处于第二自模化区，需要保证原型与模型的修正弗鲁德准数相等[6]，则可以导出:

$$Fr'=\frac{\rho_g\mu^2}{(\rho_1-\rho_g)gH}\approx\frac{\rho_g\mu^2}{\rho_1 gH} \tag{1}$$

其中

$$\mu=\frac{4Q}{\pi d^2}$$

$$\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)=\sqrt{\left(\frac{d_m}{d_p}\right)^4\left(\frac{H_m}{H_p}\right)\left(\frac{\rho_{1m}}{\rho_{1p}}\right)\left(\frac{\rho_{gp}}{\rho_{gm}}\right)} \tag{2}$$

式中，Q 为气体体积流量，m^3/s; d 为透气砖直径，m; H 为熔池深度，m; ρ_1、ρ_g 为液体和气体密度，kg/m^3; g 代表重力加速度，m/s^2; 下标 m 代表模型; 下标 p 代表原型。

将参数代入式(2)得:

$$Q_m=0.014\ 09Q_p \tag{3}$$

表 3 为原型氩气流量根据式(3)计算得到对应的氮气流量。

1.3　模拟介质的选择

首先确定模拟钢渣所需油的密度。钢-渣界面流动状态主要受到液体表面张力的作用，除了应满足几何相似和动力学相似，还要保证动力学中的韦

伯准数 We 相似[7]。

试验采用真空泵用油和煤油混合模拟精炼过程的钢渣，通过改变二者配比调节所需的密度。其中，真空泵用油和轻质油的密度分别为 880 kg/m^3 和 783 kg/m^3。

$$\frac{\rho_{N_2}\mu_w^2}{\rho_{Ar}gH_m}=\frac{\rho_{Ar}\mu_{st}^2}{\rho_{st}gH_p} \tag{4}$$

式中，μ_w、μ_{st} 分别代表水和钢液的流速，m/s；ρ_{N_2}、ρ_{Ar}、ρ_w、ρ_{st} 分别代表氮气、氩气、水和钢液的密度，kg/m^3；H_m、H_p 分别代表模型和原型的熔池深度，m。由上式计算得出：

$$\frac{\mu_w^2}{\mu_{st}^2}=\frac{\rho_{Ar}\rho_w H_m}{\rho_{N_2}\rho_{st}H_p}=\frac{\rho_{Ar}\rho_w}{\rho_{N_2}\rho_{st}\lambda} \tag{5}$$

式中，λ 为几何相似比，为 1/4。

由液-液界面的韦伯准数相似。

$$\frac{\mu_w^2\rho_w}{g\sigma_{w-o}(\rho_w-\rho_o)^{1/2}}=\frac{\mu_{sl}^2\rho_{st}}{g\sigma_{st-sl}(\rho_{st}-\rho_{sl})^{1/2}} \tag{6}$$

$$\rho_o=\rho_w-\frac{\mu_w^4\rho_w^2\sigma_{st-sl}^2}{\mu_{st}^4\rho_{st}^2\sigma_{w-o}^2}(\rho_{st}-\rho_{sl})$$

$$=\rho_w-\frac{\rho_{Ar}^2\rho_w^4\sigma_{st-sl}^2}{\rho_{N_2}^2\rho_{st}^4\sigma_{w-o}^2}\lambda^2(\rho_{st}-\rho_{sl}) \tag{7}$$

式中，σ_{w-o}、σ_{st-sl} 分别代表水-油和钢-渣的界面张力，N/m；ρ_o、ρ_{sl} 分别代表油和钢渣的密度，kg/m^3，其中 1 550 K 下，σ_{st-sl} = 1.22 N/m，298 K 下 σ_{w-o} = 0.044 N/m[8]。炉渣密度利用炉渣比容经验公式，结合某钢厂精炼渣成分数据计算总结得出，精炼渣密度在 2.8 ~ 3.2 g/cm^3，由式(7)计算得 ρ_o = 830 ~ 846 kg/m^3。

表 3 原型与模型底吹流量

Table 3 Bottom blowing flow rate of prototype ladle and physical model NL/min

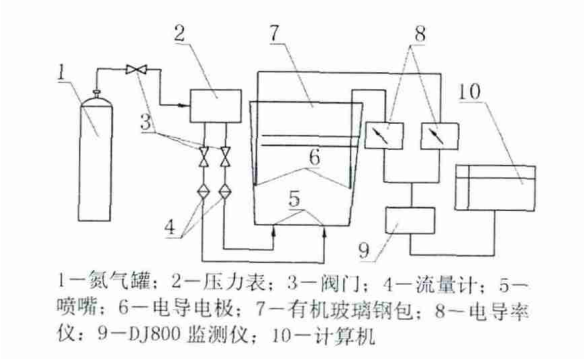
原型	模型	原型	模型
106	1.5	355	5
142	2	426	6
213	3	497	7
284	4		

模拟需要的油密度取 ρ_o = 840 kg/m^3，通过真空泵油与煤油配比调节达到上述要求，满足模型与原型 We 准数相等的条件。实际生产中渣层厚度为 100 ~ 200 mm，按照几何相似原理，水模型表面覆盖的油层厚度与实际中渣层厚度的比例应为 1∶4，本试验渣层厚度选取 25 mm。

2 试验方法

2.1 混匀时间

钢液的混合搅拌效率可以用混匀时间来定义[9]，因此可以用混匀时间间接判断钢水的搅拌能力。试验设备如图 2 所示，三根电导电极分别布置在钢包底部、中部、上部位置，试验过程的氮气分压控制在 0.1 MPa，示踪剂采用一定浓度的食盐水(100 mL 水配 20 g 食盐)。示踪剂加入位置选取中心位置，在加入示踪剂溶液的同时电脑计时。通过安置在钢包内不同位置的 3 根电极测定液体电导率，在电脑上生成变化曲线，选取 3 条曲线稳定时间最长的为混匀时间，稳定时间选取的标准为电导率波动不超过 0.005。每组试验测量 3 次，取平均值。



1—氮气罐；2—压力表；3—阀门；4—流量计；5—喷嘴；6—电导电极；7—有机玻璃钢包；8—电导率仪；9—DJ800 监测仪；10—计算机

图 2 试验装置示意

Fig. 2 Schematic of experimental device

2.2 卷渣行为模拟

试验采用真空泵油与煤油的混合溶液代替渣层。试验开始前先将液体机油均匀的布置在水面，待油表面平静时开始进行底吹。流量从小到大逐渐升高，在升高的过程中仔细观察油层，当开始有液体油滴被卷人水中时，即得到临界卷渣流量。用数码摄像机拍摄记录。

3 试验结果分析

3.1 混匀时间

3.1.1 单孔混匀时间

图 3 为单孔吹气的混匀时间。从图 3 可以看出，随着吹气流量的增加，混匀时间整体呈下降趋势，吹气流量小于 3 L/min 时，随着吹气流量的增加，混匀时间下降很快；吹气流量大于 3 L/min 时，混匀时间下降的趋势变缓。当吹气流量达到 6 L/min 时，几乎所有位置的混匀时间降到了最低，吹气流量超过 6 L/min 时，混匀时间几乎不再下降，有的混匀时间反而会升高。这是由于钢液的流动依靠气泡的上浮，上浮的动能越大，钢液流动速度越快，混

匀时间越短,但同时气泡的动能一部分消耗于液面的翻腾及冲刷包壁,吹气流量达到一定值后,再增加流量只会增加钢液的翻腾和包壁的侵蚀,而混匀时间不再降低。从图 3 还可以看出,在吹气流量小于 2 L/min 时,0.7R 位置的混匀时间要小于其他吹气位置; 而当吹气流量大于 2 L/min 时,0.7R 位置的混匀时间大于其他吹气位置; 整体上看,0.4R 和 0.7R 位置的混匀时间曲线要高于其他曲线,因此这两处的混匀效果不如其他位置。喷嘴位置在 0.5R ~0.65R 时,混匀时间实际上相差不大。

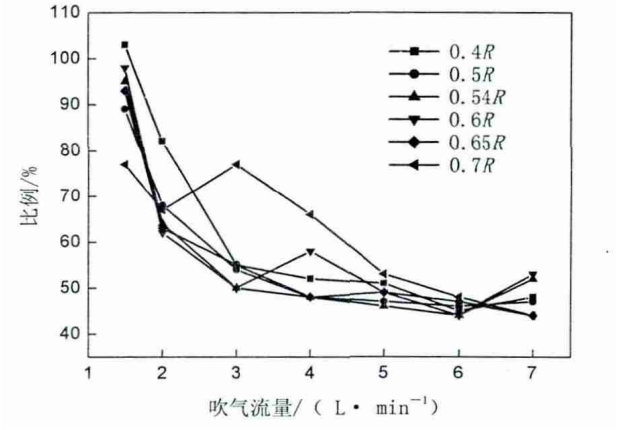


图 3　单孔吹气下的混匀时间

Fig. 3　Mixing time of single nozzle blowing

另外在 0.65R 和 0.7R 位置进行混匀试验时,发现在大流量下(6 ~7 L/min) 气泡柱形成的气圈靠近包壁,水流从气圈涌出,快速的冲向包壁。这种情况下钢液对钢包内壁的侵蚀加剧,因此单从这一点考虑,0.65R 和 0.7R 位置的方案不宜选用。

3.1.2　双孔混匀时间

双孔吹气时的设置流量为双孔总流量,试验结果如图 4 所示,从图 4(a) 可知,两喷嘴 0.4R 同周布置,流量较小时,两喷嘴夹角为 180°时混匀时间最小,三个角度整体混匀时间相差不大。由图 4(b) 和图 4(c) 可知,两喷嘴夹角为 180°时混匀时间最小,两喷嘴布置在 0.5R 时角度差异对混匀时间影响比较明显。图 4(d) 为两喷嘴夹角为 180°,但分别布置在不同周圆上的混匀时间,比较可知 0.5R 同周圆布置,夹角 180°时的混匀时间最小。

由双孔吹气的试验结果得出较优的双吹工艺为两喷嘴布置在 0.5R 同周圆上,夹角 180°,将单吹工艺的最优方案与双吹工艺的最优方案对比(如图 5 所示) ,在流量相等的情况下,单吹工艺的混匀时间稍低于双吹工艺。由图 5 还可知,双喷嘴吹气,吹气总流量为 3 L/min 的混匀时间远远小于单喷嘴吹气,流量 1.5 L/min 时的混匀时间,这说明双喷嘴吹气总量大于单吹时,双吹时的混匀时间较短。

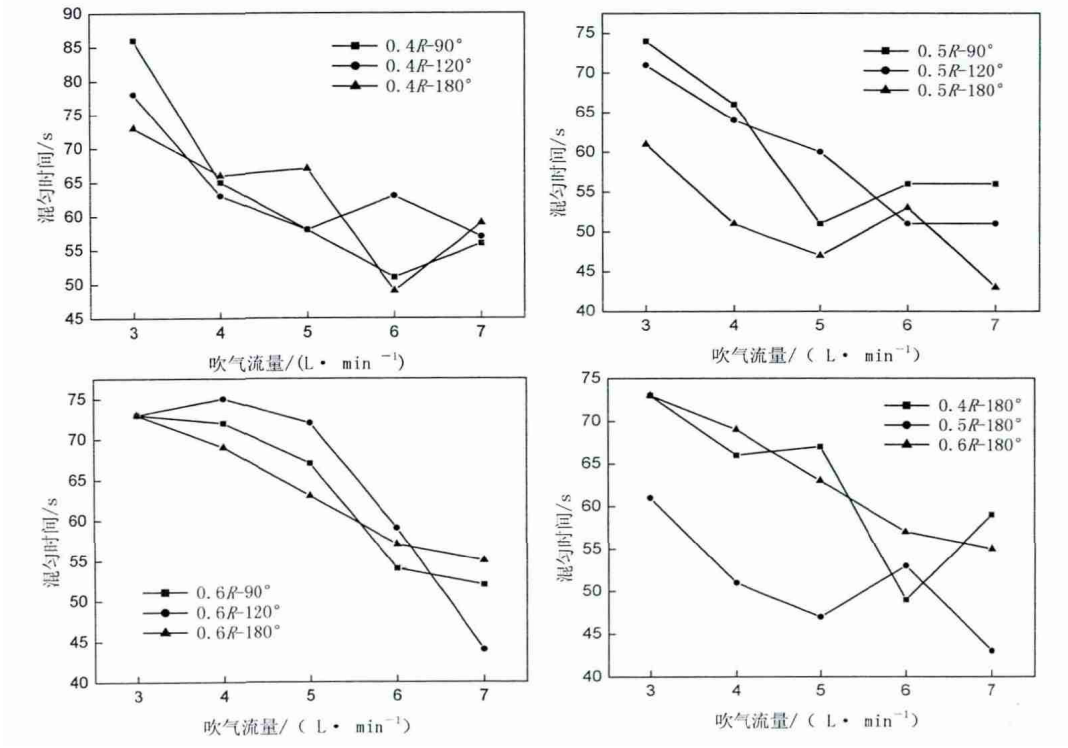


图 4　双孔吹气下的混匀时间

Fig. 4　Mixing time of double nozzles

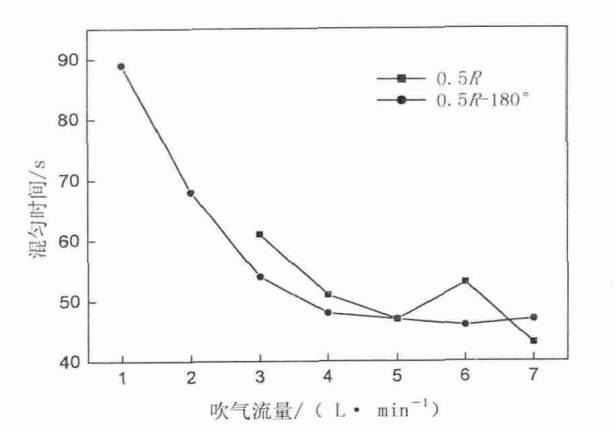


图 5 单吹与双吹工艺混匀时间的比较

Fig. 5 Comparison of mixing time between single nozzle and double nozzles

3.2 卷渣模拟

3.2.1 单吹工艺

试验测出渣层厚度 25 mm 时，单孔 0.4R、0.5R、0.55R 和 0.6R 位置的临界卷渣流量都为 2 L/min，吹气孔位置对临界卷渣量的影响不明显。图 6 为 0.5R 位置的卷渣过程，图 6(a) 对应 1 L/min 的渣面现象，图 6(b) 对应 2 L/min 的渣面现象。图 7 为油被卷入水中的深度与吹气量的关系，单孔吹气流量小于 2 L/min 时，渣面平静的波动，无卷渣现象。单吹流量为 2 L/min 时，开始有少量小油滴分离进入水中，小油滴在油层下部上下浮动，油滴进入水中的深度为 20 cm。流量为 3 L/min 时，大油滴进入水中 10 cm，小油滴进入水中 30 cm。流量达到 4 L/min 时，大量油滴进入水中，大部分集中在 25 cm 深度，少量小油滴进入水中的深度达到 40 cm，接近钢包底部。此时卷渣较为严重，但同时钢渣接触面积大大增加，精炼过程由于脱硫、脱氧的需要，钢渣接触面积越大越好，因此吹气流量至少要达到 4 L/min。流量达到 5 ~ 7 L/min 时，卷渣效果进一步增强。

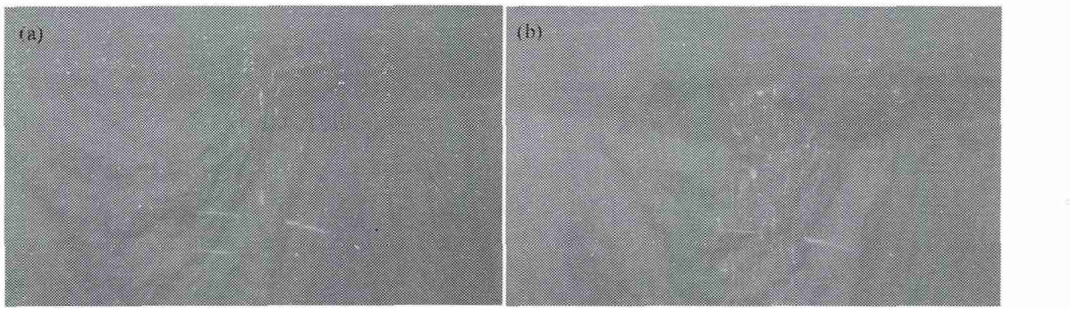


图 6 卷渣过程

Fig. 6 Slag entrapment

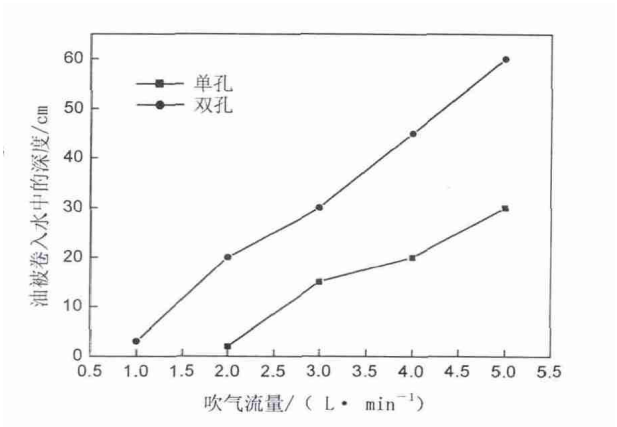


图 7 油被卷入水中的深度与吹气量的关系

Fig. 7 Relationship between depth of oil into water and amount of blowing

图 8 为不同流量下钢液裸露面积的大小。由图 8 可知，钢液裸露面积随流量的增加而增加，裸露面积由 14% 增加到 46%，为了减轻钢水的二次氧化，软吹时的裸露面积应该尽量小，结合混匀时间的考虑，单孔软吹时吹气流量应控制在 1.5 ~ 2 L/min。

3.2.2 双吹工艺

试验模拟两喷嘴距圆心 0.5R，夹角 180°的卷渣行为，油滴卷入水中的深度如图 7 所示，吹气流量小于 3 L/min 时，渣面平静波动，无卷渣现象发生；流量达到 3 L/min 时，少量小油滴被卷入水中 15 cm；吹气流量达到 4 L/min 时，少量小油滴进入水中深度 20 cm；流量为 5 L/min 时，油滴进入水中的深度为 30 cm。试验结果表明双吹卷渣临界流量低于单吹，这说明双吹更不容易卷渣。

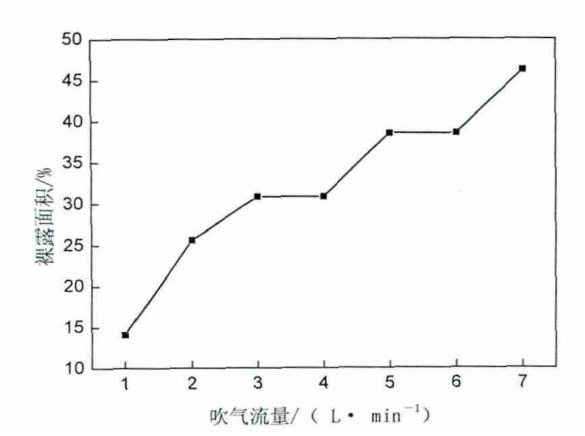


图 8　钢液裸露面积与吹气流量的关系

Fig. 8　Relationship between bare area and amount of blowing

4　结论

1）混匀时间随着吹气流量的增加而降低，单孔吹气流量小于 3 L/min 时，混匀时间随流量的增加快速下降，流量超过 3 L/min 时，混匀时间降低趋势减慢。单孔吹气方案中，喷嘴布置在 0.5R 至 0.65R 之间的混匀时间较低，但喷嘴距中心达到 0.65R 时，钢液对包壁的侵蚀较为严重，因此喷嘴距中心距离应小于 0.65R。

2）双孔吹气方案中，0.5R 同周圆布置，夹角 180°时混匀时间较优，在吹气流量相等的情况下，单孔最佳方案的混匀时间要低于双孔最佳方案。单双吹工艺都存在一个最佳吹气流量，本试验条件下的最佳吹气流量为 6 L/min，折合成实际流量为 426 L/min。

3）本试验条件下得出单吹的临界卷渣流量为 142 L/min，双吹临界卷渣流量为 213 L/min，双吹临界卷渣流量大于单吹。

参考文献

[1] Zhou Li, Dai Wei, Cao Chenghu, *et al*. A study on water model for 120 t ladle bottom argon blowing process [J]. Special Steel, 2012, 33(4): 6-9.
（周俐，戴伟，曹成虎，等. 120 t 钢包底吹氩工艺水模型研究 [J]. 特殊钢，2012，33(4)：6-9.）

[2] Yang Fang, Shen Qiaozhen, Peng Qi, *et al*. A study on optimization of bottom argon blowing in 100 t ladle [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(s1): 108-112.
（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(增刊 1)：108-112.）

[3] Zhong Liangcai, Li Zhuang, Liang Feng, *et al*. Physical simulation on bottom argon blowing for 120 t ladle [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(s1): 103- 107.
（钟良才，李壮，梁锋，等. 120 t 精炼钢包底吹氩物理模拟 [J]. 过程工程学报，2010，10(增刊 1)：103- 107.）

[4] Lin Xiaochuan, Li Jingshe, Jiang Jing, *et al*. Water simulation study on mixing time of 100 t ladle [J]. Metallurgical Collections, 2010(2): 10-13.
（林晓川，李京社，蒋静，等. 100 t 钢包内混匀时间的水模拟研究 [J]. 冶金丛刊，2010(2)：10-13.）

[5] Cao Zhen, Ai Xingang, Li Shengli, *et al*. Physical simulation of metal-slag interfacial behavior for ladle of bottom argon blowing [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2013, 36(2): 117-119.
（曹震，艾新港，李胜利，等. 底吹氩钢包精炼中钢渣界面行为物理模拟 [J]. 辽宁科技大学学报，2013，36(2)：117-119.）

[6] Zhao Lihua, Ma Wenjun, Wang Min. Physical modeling of argon bottom blowing refining in a 100 t ladle [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014(s1): 140-144.
（赵立华，马文俊，王敏. 100 t 钢包吹氩精炼过程的物理模拟 [J]. 北京科技大学学报，2014(增刊 1)：140-144.）

[7] Zhu Miaoyong, Xiao Zeqiang. Mathematical physics simulation of refining of steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.
（朱苗勇，萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟 [M]. 北京：冶金工业出版社，1998.）

[8] Ai Xingang, Bao Yanping, Wu Huajie, *et al*. A study on water modeling of ladle with bottom argon blowing in critical slag entrapment condition [J]. Special Steel, 2009, 30(2): 7-9.
（艾新港，包燕平，吴华杰，等. 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究 [J]. 特殊钢，2009，30(2)：7-9.）

[9] Nakanishi K, Fujii T, Szekely J. Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel-processing operations [J]. Ironmaking Steelmaking, 1975, 2(3): 193-197.

编辑　余文华