

关于 210 t RH 混匀时间影响因素的水模型研究

申甜甜 郭汉杰 李 宁

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘 要 采用 1:4 的比例建立水力学模型模拟 210 t RH 内钢液流动,考察吹氩量(1 000 ~ 1 400 L/min),浸渍管插入深度(125 ~ 175 mm),吹氩孔个数(4 ~ 6)对混匀时间的影响。结果表明,对吹氩量大小的确定,需综合考虑各因素的影响;浸渍管插入过深不利于钢液混匀;较少的上层吹氩孔个数和增加下层吹氩孔个数可获得较短的混匀时间;最佳参数为吹氩量 3.87 m³/h,浸入深度 120 mm,上吹氩孔 4 个,下吹氩孔 6 个。借助 matlab 工具求解有约束非线性最优化问题,计算得出回归方程的混匀时间极小值为 27.02 s。

关键词 210 t RH 混匀时间 水模型 吹氩量 浸渍管插入深度 吹氩孔个数

A Study on Water Model of Influence Factors on Mixing Time of Liquid in a 210 t RH Unit

Shen Tiantian, Guo Hanjie and Li Ning

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

Abstract A water model of 1:4 scale has been established to simulate the liquid flowing in the 210 t RH unit, and to study the effect of argon blowing rate (1 000 ~ 1 400 L/min), snorkel insertion depth (125 ~ 175 mm) and blowing argon hole number (4 ~ 6) on mixing time of liquid. Results show that to define the argon blowing rate needs to comprehensively consider the effect of each factor; it is not available to mix liquid as the snorkel inserts too depth; it is available to get an ideal mixing time with lesser number of upper argon blowing hole and increasing the number of lower argon blowing hole; and the optimum process parameters are argon blowing rate 3.87 m³/h, snorkel insertion depth 120 mm, upper argon blowing hole number 4 and lower argon blowing hole number 6. The constrained nonlinear optimization question is solved by matlab tool to calculate and get regression equation minimum value of mixing time- 27.02 s.

Material Index 210 t RH Unit, Mixing Time, Water Model, Argon Blowing Rate, Snorkel Insertion Depth, Number of Argon Blowing Hole

RH 精炼过程的关键性环节在于钢液的循环流动和混合,成分及温度的均匀化、精炼反应的速率及效果等都与钢液的流动和混合相关^[1],国内外已做过很多关于提高精炼反应效率的研究^[2-4]。同时,关于钢液流动过程中对浸渍管的化学侵蚀缩短浸渍管寿命的研究也有很多^[5,6],但不能忽略机械力冲刷对浸渍管使用寿命的影响,钢液循环流动和混合特性是研究浸渍管受钢液机械力冲刷的关键因素。

1 实验设备及方法

采用 1:4 比例建立了 RH 水模型实验装置如图 1 所示。由氧气瓶提供的氧气来代替氩气作为驱动气体,钢包中使用自来水模拟钢液,在钢包底部采用电导探头连接电导率仪,再将数据传输至计算机收集整理。最后通过计算机整理的钢包中水电导率的变化情况计算出 RH 钢液混匀时间。

Kato 在水模型研究 RH-OB 时认为喷嘴均布在

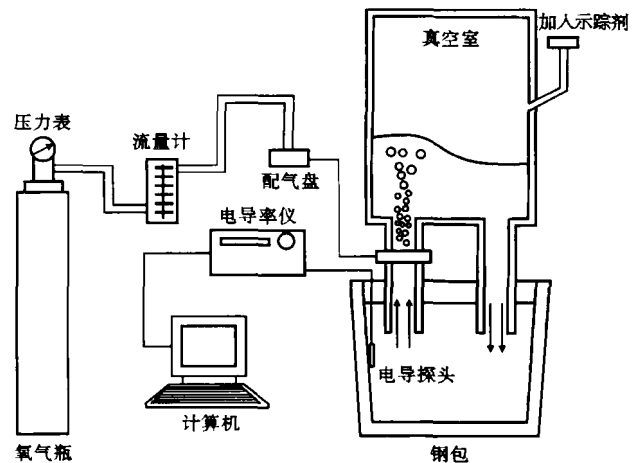


图 1 水模型实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of water model experimental device

一层或两层的水平面上的效果相近^[7],所以,在此实验中忽略了堵塞吹氩孔所在层数对流场和混匀时

间的影响,只考虑了堵塞个数。实验的因素水平及正交实验设计见表 1 和表 2。

表 1 实验因素水平表
Table 1 Test factors and level list

水平因素	吹氩量/ (L·min ⁻¹)	浸渍管插入深度/mm		吹氩孔堵塞 个数
		原型	模型	
1	1 000	500	120	0
2	1 200	600	150	2(同一层)
3	1 400	700	175	2(分两层)

表 2 正交实验表
Table 2 Orthogonal design test schedule

实验 编号	吹氩量		浸渍管插入 深度/mm		吹氩孔数/个		混匀 时间 Y/s
	原型/ (L·min ⁻¹)	模型(x ₁)/ (m ³ ·h ⁻¹)	原型	模型 (x ₂)	上	下	
					(x ₃)	(x ₄)	
T1	1 000	3.2	500	125	6	6	83.50
T2	1 000	3.2	600	150	5	5	101.00
T3	1 000	3.2	700	175	4	6	71.08
T4	1 200	4.0	500	125	5	5	54.50
T5	1 200	4.0	600	150	6	4	78.00
T6	1 200	4.0	700	175	6	6	97.00
T7	1 400	5.2	500	125	4	6	59.50
T8	1 400	5.2	600	150	6	6	50.00
T9	1 400	5.2	700	175	6	4	62.50

2 混匀时间的测定

本实验用 DJ800 型多功能监测系统,整个系统配置由计算机、电测仪、各种传感器及相应软件组成。

在真空室加入 200 mL 饱和 KCl 水溶液作示踪剂来研究混匀,加入饱和 KCl 溶液的同时用电导探头^[8]由 DJ800 型电导仪测量钢包内上升管下方接近钢包底部位置电导率的变化,以其偏差达到最终平均电导率的 ±0.5% 定为混合时间 τ_m ,对每一工况测定 2~3 次,取所得结果的算数平均值作为该工况下的混匀时间,由于 KCl 水溶液的电导率与其浓度成线性关系,由电导率随时间的变化曲线也可以确定钢包内水溶液浓度随时间的变化规律。

上升管下部安装 DDLY-2005 型电导率仪(含电导电极),量程 0~20 mS/cm,误差 ±0.5% F.S。将测得示踪剂浓度信号传输至 DJ800 多功能监测系统进行采集和记录,然后通过电脑显示出来,整个系统配置由计算机、电测仪、各种传感器及相应软件组成。

3 实验结果及分析

由正交实验表 2 所得数据,利用非线性优化得到混匀时间模型为:

$$Y = 0.73 + 2.9(x_1 - 4.1) - 0.45(x_2 - 1.16) - 0.43(x_3 - 2.69) + 3.88(x_4 - 4.05) + 11.44(x_1 - 4.1)^2 + 0.004(x_2 - 1.16)^2 - 9.09(x_3 - 2.69)^2 + 2.67(x_4 - 4.05)^2 + 0.06(x_1 - 4.1)(x_2 - 1.16) - 18.05(x_1 - 4.1)(x_3 - 2.69) + 9.7(x_1 - 4.1)(x_4 - 4.05) + 0.32(x_2 - 1.16)(x_3 - 2.69) - 0.15(x_2 - 1.16)(x_4 - 4.05) + 2.85(x_3 - 2.69)(x_4 - 4.05) (R = 1.0)$$

借助 matlab 工具求解有约束非线性最优化问题,计算得出回归方程的混匀时间极小值为 $Y = 27.02$ s,与其对应的各变量值分别为:吹氩量 $x_1 = 3.87$ m³/h,浸渍管插入深度 $x_2 = 120$ mm,上层吹氩孔个数 $x_3 = 4$,下层吹氩孔个数 $x_4 = 6$ 。

3.1 单因素对混匀时间的影响

3.1.1 吹氩量

从图 2(a)中可以看出,在浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔个数不变的情况下,随着吹氩量的增大,混匀时间逐渐缩短,当吹氩量增大到 3.87 m³/h 时,相当于原型吹氩量为 1 161 L/min,此时混匀时间最短,为 27.02 s。但当吹氩量继续增大,混匀时间反而逐渐增加。因此,可认为 210 t RH 钢包的临界吹氩量约为 1 161 L/min。

3.1.2 浸渍管插入深度

当吹氩量、上层和下层吹氩孔个数固定不变时,从图 2(b)中可以看出,浸渍管插入深度对混匀时间的影响趋势与图 2(a)中吹氩量对混匀时间的影响趋势相似,都成抛物线形,但图 2(b)的变化趋势较图 2(a)平缓。鉴于图 2(a)的分析,从图 2(b)中可以得到浸渍管临界插入量为 43.4 mm,相当于原型浸渍管插入深度为 174 mm。此值与回归结果求出的混匀时间极小值对应的浸渍管插入深度 120 mm 相差较大,这是由于考虑到实际操作的需要,在实际操作中,浸渍管插入深度不能过浅,否则会对现场操作造成危险。由图 2(b)中分析得出,浸渍管插入深度虽然可以使钢液混匀时间达到较短,但是不符合实际操作要求,因此不能作为混匀时间的参考依据。综合各因素的影响,回归结果及 matlab 程序运算,模型中浸渍管最佳插入深度为 120 mm,折合实际 210 t RH 的浸渍管最佳插入深度为 480 mm。

3.1.3 上层吹氩孔数量

图 2(c)为上层吹氩孔个数对混匀时间的影响。结合实际操作情况,在吹氩量、浸渍管插入深度及下

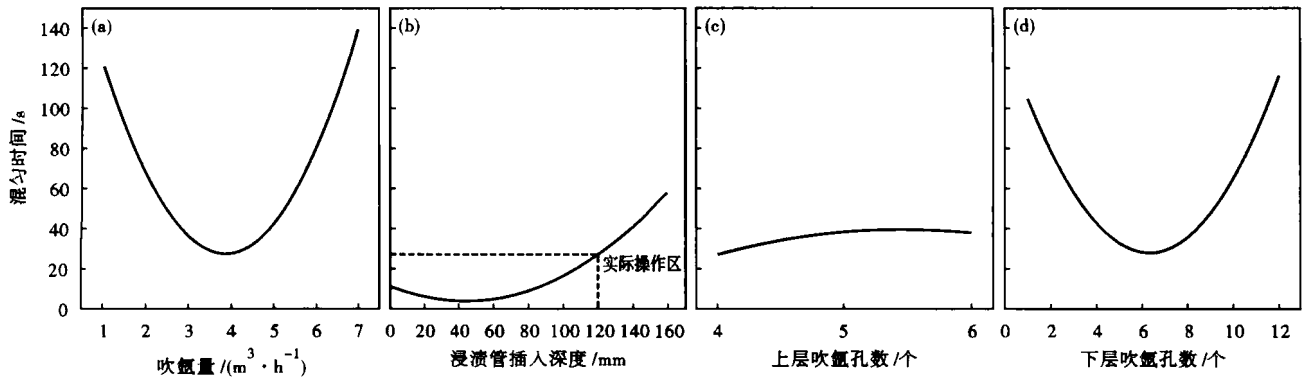


图 2 吹氩量(a),浸渍管插入深度(b),上层吹氩孔个数(c)和下层吹氩孔个数(d)对混匀时间的影响

Fig. 2 Effect of argon blowing rate (a), snorkel insertion depth (b), upper argon blowing hole number (c) and lower argon blowing hole number (d) on mixing time of liquid

层吹氩孔个数不变的条件下,模型设计实验中当上层吹氩孔个数为 4 个时,混匀时间最短为 27.02 s,与回归结果一致。可以认为,上层吹氩孔个数不宜过多,应合理分布。

3.1.4 下层吹氩孔数量

在吹氩量、浸渍管插入深度及上层吹氩孔个数不变的条件下,图 2(d)中下层吹氩孔个数对混匀时间的影响趋势与图 2(a)非常相似。从图 2(d)中分析可知,随着下层吹氩孔个数的增加,混匀时间明显缩短,当下层吹氩孔个数达到 6 个时,混匀时间为 27.37 s,接近最小值;继续增加下层吹氩孔个数,则混匀时间急剧增加。因此,可以认为在其他 3 个因素不变的情况下,下层临界吹氩孔个数为 6 个。

3.2 双因素对混匀时间的综合影响

3.2.1 上层和下层吹氩孔数

从图 3(a)看出,当下层吹氩孔个数较少时,随着上层吹氩孔个数的增加,混匀时间不一定逐渐缩短,中间过程反而有增加的趋势;当上层和下层吹氩孔个数都达到 6 个时,混匀时间也不是最短。上层吹氩孔个数为 4 个时,混匀时间随着下层吹氩孔个数的增加而减小;上层吹氩孔个数为 5 时,随着下层吹氩孔个数的增加,混匀时间反而增加;若上层吹氩孔个数继续增大到 6 个,混匀时间随着下层吹氩孔个数的增加,变为先减小后增大,变化趋势不稳定。

3.2.2 浸渍管插入深度和吹氩量

从图 3(b)明显看出,无论是在较小吹氩量还是较大吹氩量下,混匀时间都随着浸渍管插入

深度的增加而增加;较大浸渍管插入深度时,混匀时间随着吹氩量的增加,表现为波动趋势;在相对较小浸渍管插入深度条件下,随着吹氩量的增加,混匀时间变化呈现减小的趋势。

3.2.3 吹氩量和下层吹氩孔个数

由图 4(a)可以看出,下层吹氩孔个数无论在较少还是较多情况下,随着吹氩量的增加,混匀时间减小趋势相当明显;在较小吹氩量的情况下,增加下层吹氩孔个数,混匀时间减小趋势较强;随着吹氩量的增大,混匀时间随着下层吹氩孔个数的增加,减小趋势较弱,甚至出现增加趋势。

3.2.4 上层吹氩孔个数和吹氩量

经图 4(b)分析可以看出,在较小吹氩量条件下,随着上层吹氩孔个数的增加,混匀时间逐渐增大,而且增加趋势很明显;较大的吹氩量,可以使混匀时间随着上层吹氩孔个数的增加而减小。但无论在较小吹氩量还是较大吹氩量条件下,当上层吹氩孔个数为 4 时,都可使混匀时间达到较小值。

3.2.5 上层吹氩孔数和浸渍管插入深度

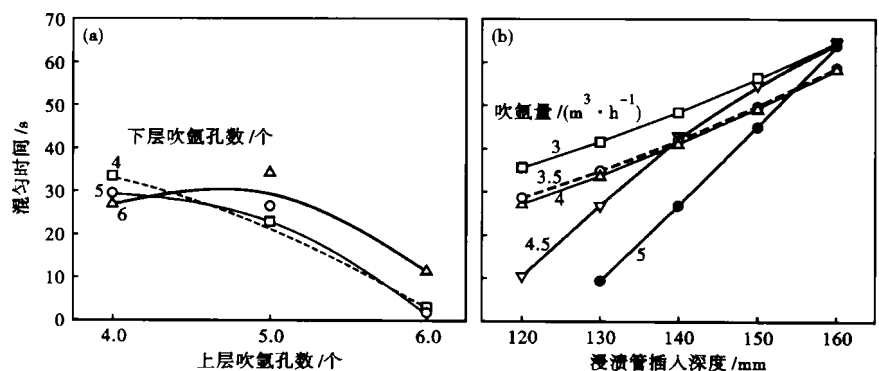


图 3 上层和下层吹氩孔数(a),浸渍管插入深度和吹氩量(b)共同对混匀时间影响
Fig. 3 Effect of upper and lower argon blowing hole number (a), snorkel insertion depth and argon blowing rate (b) on mixing time of liquid

从图 5(a)综合分析认为,上层吹氩孔数和浸渍管插入深度分别为 4 和 120 mm 时,可获得较为理想的混匀时间,与回归方程分析所得结果一致。

3.2.6 浸渍管插入深度和下层吹氩孔数

由图 5(b)分析得出,在一定的下层吹氩孔数下,混匀时间都会随着浸渍管插入深度的增加而增加;实验最大的下层吹氩孔数和最小浸渍管插入深度可获得理想的混匀时间。

3.3 三因素对混匀时间的综合影响

3.3.1 浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔数

图 6(a)为四维切片图,所示情况为在吹氩量不变的条件下,浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔数对钢液混匀时间的影响。

从图 6(a)分析得出,随着下层吹氩孔个数的增加,混匀时间逐渐缩短;上层吹氩孔个数对混匀时间的影响则与之相反,由此说明并不是吹氩孔个数越多越好;随着浸渍管插入深度的减小,混匀时间逐渐缩短。虽然较小的浸渍管插入深度能够保证较短的混匀时间,但考虑到实际操作的需要,不能无限制的减小浸渍管插入深度,否则会对生产造成影响,甚至生产事故。

3.3.2 吹氩量、上层和下层吹氩孔数

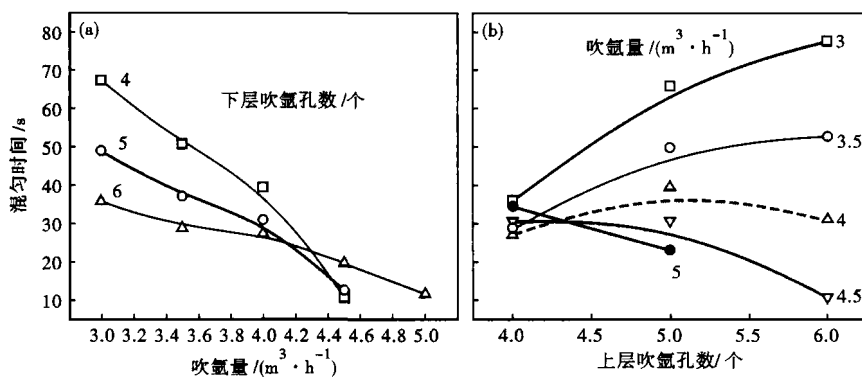


图 4 吹氩量和下层吹氩孔个数(a),上层吹氩孔个数和吹氩量(b)共同对混匀时间的影响
Fig. 4 Effect of argon blowing rate and lower argon blowing hole number (a), upper argon blowing hole number and argon blowing rate (b) on mixing time of liquid

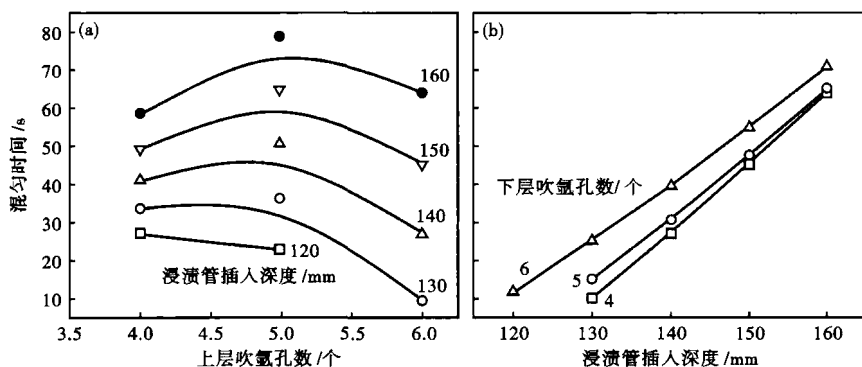


图 5 上层吹氩孔数和浸渍管插入深度(a),浸渍管插入深度和下层吹氩孔数(b)共同对混匀时间的影响
Fig. 5 Effect of upper argon blowing hole number and snorkel insertion depth (a), snorkel insertion depth and lower argon blowing hole number (b) on mixing time of liquid

在浸渍管插入深度一定时,吹氩量、上层和下层吹氩孔个数对混匀时间的影响四维切片图,如图 6(b)所示。图 6(b)上层和下层吹氩孔个数对混匀时间的影响与图 6(a)所示结果一致,即随着下层吹氩孔个数的增加,混匀时间缩短;随着上层吹氩孔个

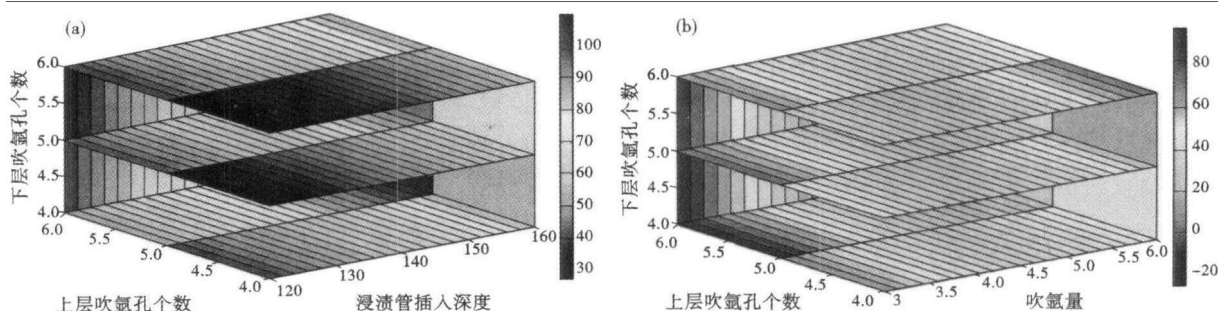


图 6 浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔个数(a),吹氩量、上层和下层吹氩孔个数(b)对混匀时间的影响
Fig. 6 Effect of snorkel insertion depth, upper and lower argon blowing hole number (a), argon blowing rate, upper and lower argon blowing hole number (b) on mixing time of liquid

数的减少,混匀时间逐渐减小。而吹氩量对混匀时间的影响没有如此明显的趋势,从图中分析得出,吹氩量在中间值偏右位置,混匀时间相对较小,较大或者较小的吹氩量都不能达到较好的混匀时间。

3.3.3 吹氩量、浸渍管插入深度及下层吹氩孔个数

图7(a)所示四维切片为在上层吹氩孔个数一定的条件下,吹氩量、浸渍管插入深度和下层吹氩孔个数对混匀时间的影响。分析得出,下层吹氩孔个数对混匀时间的影响与图6(a)(b)趋势一致,随着下层吹氩孔个数的增加,混匀时间逐渐缩短;浸渍管插入深度对混匀时间的影响与图6(a)中浸渍管插

入深度对混匀时间的影响趋势相同,即减小浸渍管插入深度,则有利于钢液混匀,混匀时间减少。

3.3.4 吹氩量、浸渍管插入深度和上层吹氩孔个数

图7(b)所示四维切片图为在下层吹氩孔个数一定的情况下,吹氩量、浸渍管插入深度及上层吹氩孔个数对混匀时间的影响。经图7(b)中分析,显然上层吹氩孔个数对混匀时间的影响与图6(a)(b)影响趋势一致;浸渍管插入深度对混匀时间的影响趋势与图7(a)、图6(a)也相同,分析结果见上述3个图。然而,吹氩量对混匀时间的影响与图6(b)、图7(a)略有差别。

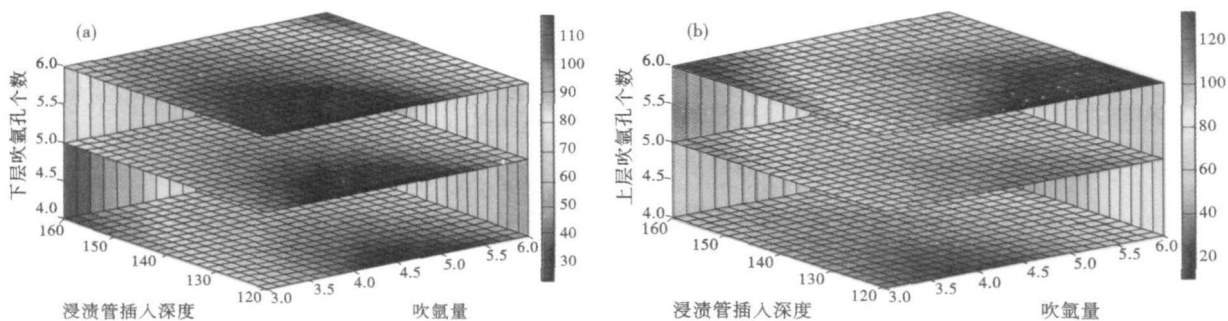


图7 吹氩量、浸渍管插入深度及下层吹氩孔个数(a),吹氩量、浸渍管插入深度和上层吹氩孔个数(b)对混匀时间的影响
Fig.7 Effect of argon blowing rate, snorkel insertion depth and lower argon blowing hole number (a), argon blowing rate, snorkel insertion depth and upper argon blowing hole number (b) on mixing time of liquid

综上所述,在某一确定因素下,3个因素对混匀时间的综合影响,除吹氩量的调整需考虑浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔个数,不能单纯以增加吹氩量或减小吹氩量来达到缩短混匀时间的目的外,上述3个因素在4种情况下,对混匀时间的影响趋势是一致的。单独改变其中的一个因素,都会对混匀时间造成较大的影响。

4 小结

(1)吹氩量、浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔个数对钢液混匀时间的影响都非常明显,其中吹氩量及下层吹氩孔个数的变化对钢液混匀时间的影响趋势较为强烈。

(2)吹氩量、浸渍管插入深度、上层吹氩孔个数、下层吹氩孔个数4因素最佳值分别为:3.87 m³/h、120 mm、4个和6个。

(3)在某一确定因素下,3个因素对混匀时间的综合影响,除吹氩量的调整需考虑浸渍管插入深度、上层和下层吹氩孔个数,不能单纯以增加吹氩量或减小吹氩量来达到缩短混匀时间的目的外,上述3个因素在4种情况下,对混匀时间影响趋势一致。

参考文献

- 舒宏富,宋超,张晓峰,等. RH-MFB真空精炼过程中循环流量的物理模拟研究. 材料与冶金学报,2004,3(2):107
- Kuwabara T, Umezawa K, Mori K, et al. Investigation of Decarburization Behavior in RH Reactor and its Operation Improvement. Transaction ISIJ, 1988, 28(4):305
- Hanna R K, Jones T, Blake R I, et al. Water Modeling to Aid Improvement of Degasser Performance for Production of Ultralow Carbon Interstitial Free Steels. Ironmaking Steelmaking, 1994, 21(1):37
- Frank A, Wolfgang P. Circulation Rate of Liquid Steel in RH Degassers. Steel Research, 1998, 69(2):54
- 赵素华,许海亮,王军,等. RH-TB浸渍管长寿技术研究与应用. 中国冶金, 2009, 19(2):28
- Haldar M K, Tripathi H S, Das S K, et al. Effect of Compositional Variation on the Synthesis of Magnesite-chrome Composite Refractory. Ceramics International, 2004, 30:911
- Yoshiei Kato. Fluid Flow in Ladle and Its Effect on Decarburization Rate in RH Degasser. ISIJ International, 1993, 33(10):1088
- Wei Ji-He. Physical Modeling of the Vacuum Circulation Refining Process of Molten Steel. Journal of Shanghai University (English Edition), 2003, 7(1):1

申甜甜(1982-),女,硕士生, RH精炼工艺研究。

收稿日期:2011-06-18