

34 t 中间包底吹气水模型实验

樊文军^{1,2} 曹雄¹ 张胤^{1,2}

(内蒙古科技大学:1 稀土学院;2 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室和
省部共建国家重点实验室培养基地,包头 014010)

摘要 以钢厂 34 t 板坯连铸中间包为研究对象,依据几何相似原理,建立 1:3 的水力学实验模型,按照 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行试验。结果表明,四因素的主次关系依次是气盒与堰间距、堰深、吹气量、堰与长水口间距;在最佳参数为吹气量 450 L/h、堰深 110 mm、气盒与堰间距 235 mm 和堰与长水口间距 195 mm 时,平均停留时间达到 360 s,死区体积比例降低到 11.47%,活塞区体积比例提高到 21.95%,综合评分达到 100.48。

关键词 中间包 底吹气 水模型

An Experiment on Water Model for Bottom Gas Blowing of a 34 t Tundish

Fan Wenjun^{1,2}, Cao Xiong¹ and Zhang Yin^{1,2}

(1 School of Rare Earth; 2 Inner Mongolia Key Lab for Utilization of Baiyun Ebo Multi-metallic Resources and
Elected State Key Lab, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract According to the studied object of a 34 t tundish for slab concasting at steel works and based on geometric similarity principle, the 1:3 water test model has been established and the test carried out according to orthogonal table $L_{16}(4^5)$. Test results show that relationship between primary and second for four factors in order of precedence is distance between gas box and dam, depth of dam, gas blowing rate and distance between dam and long nozzle; with optimum parameters-gas blowing rate 450 L/h, depth of dam 110 mm, distance between gas box and dam 235 mm and distance between dam and long nozzle 195 mm, the average residence time is up to 360 s, the volume fraction of dead zone decreases to 11.47%, the volume fraction of piston zone increases to 21.95% and the comprehensive score is up to 100.48.

Material Index Tundish, Bottom gas Blowing, Water Model

为进一步发挥中间包的精炼作用,冶金工作者做了大量关于中间包冶金的研究工作^[1-5]。中间包底吹气不仅可以改变钢液的流动状态,促进钢液的混合,有利于温度成分的均匀,而且产生的小气泡能捕获夹杂物颗粒,带动夹杂物上浮,有利于纯净钢的生产。同时惰性气体上浮后在中间包上部形成惰性气氛,对中间包中的钢水有保护作用。本文以钢厂 34 t 板坯连铸双流中间包,铸坯规格 220 mm × 1 550 mm 为研究对象,建立物理模型,并进行模拟试验。

1 实验原理及方案

为保证模型和原型几何相似,本实验模型按与实物 1:3 比例采用有机玻璃制成,原型与模型尺寸见表 1。动力学相似主要考虑惯性力、粘性力和重力,这些力主要用 Re 和 Fr 准数描述。但相似理论认为,当模型系统中与粘性力有关的雷诺数(Re)进入第二自模化区的临界值($10^4 \sim 10^5$)时,系统处于自模化状态,即该系统的流动状态、流速分布与 Re 无关,只要保证与重力有关的弗鲁德准数相等即可,

表 1 中间包原型和水模型相关参数/mm

Table 1 Relative technical parameter of original tundish and water model/mm

项目	液面深度	坝高	堰深	坝堰间距	堰与长水口间距
原型	1 005	255	240	465	825
水模型	335	85	80	155	275

由此可以确定实验中对对应的水的体积流量。

确定中间包底吹气量、堰深、气盒与堰间距、堰与长水口间距作为中间包控流装置的主要参数,故而定为本实验的 4 个因素,分别用 M 、 N 、 O 、 P 表示,每个因素选取 4 个水平分别用 1、2、3、4 表示。正交实验按照 $L_{16}(4^5)$ 正交实验表来安排,见表 2。

2 底吹气实验结果及分析

对 RTD 曲线的处理^[6]计算得到的底吹气研究正交实验相关数据见表 2。从表 2 可见,在同样的拉速条件下,改变吹气量、堰深、气盒与堰间距、堰与长水口间距,中间包的综合评分值有了较大的提高,其平均综合评分值为 89.10,相对于原工况综合评

表2 水模型正交实验方案和试验结果
Table 2 Water model orthogonal test program and test results

方案	因素					平均停留时间/s	死区体积比例/%	活塞区体积比例/%	综合评分
	吹气量(M)/(L·h ⁻¹)	堰深(N)/mm	气盒与堰间距(O)/mm	堰与长水口间距(P)/mm					
t21	(1) 180	(1) 80	(1) 115	(1) 195		328.00	19.14	12.61	83.47
t22	(1) 180	(2) 90	(2) 155	(2) 235		321.13	21.10	13.35	82.25
t23	(1) 180	(3) 100	(3) 195	(3) 275		314.24	22.79	11.88	79.08
t24	(1) 180	(4) 110	(4) 235	(4) 315		317.89	21.89	20.15	88.25
t25	(2) 270	(1) 80	(2) 155	(3) 275		335.43	17.58	10.89	83.31
t26	(2) 270	(2) 90	(1) 115	(4) 315		309.13	24.05	10.07	76.03
t27	(2) 270	(3) 100	(4) 235	(1) 195		346.83	14.78	25.06	100.28
t28	(2) 270	(4) 110	(3) 195	(2) 235		327.27	19.59	9.75	80.16
t29	(3) 360	(1) 80	(3) 195	(4) 315		314.16	22.81	20.07	87.25
t30	(3) 360	(2) 90	(4) 235	(3) 275		322.72	20.71	20.88	90.18
t31	(3) 360	(3) 100	(1) 115	(2) 235		330.19	18.87	24.24	95.37
t32	(3) 360	(4) 110	(2) 155	(1) 195		341.89	16.00	25.23	99.23
t33	(4) 450	(1) 80	(4) 235	(2) 235		340.05	16.45	19.90	93.45
t34	(4) 450	(2) 90	(3) 195	(1) 195		348.74	14.32	23.59	99.27
t35	(4) 450	(3) 100	(2) 155	(4) 315		326.50	19.78	21.29	91.51
t36	(4) 450	(4) 110	(1) 115	(3) 275		341.08	16.20	22.93	96.73

分值 73.40 提高了 15.70, 其中最大值达到了 100.28。

对表 2 中的各指标及综合评分值进行极差分析。根据本实验的具体情况, 规定基础分为 70, 死区体积比例按 30% 为标准, 每增高 1% 就减 1 分, 每降低 1% 就加 1 分; 活塞区体积比例按 10% 为标准, 每增高 1% 就加 1 分, 每降低 1% 就减 1 分。同样, 令 K_i 为同一因素下 i 水平实验结果的平均值, 则 X (M, N, O, P) 因素下的极差表达式为 $R_X = \max_{i=1}^4 (K_i, X) - \min_{i=1}^4 (K_i, X)$, 将各指标极差计算结果分别列入表 3。从表 3 可以得到以不同指标作为判据的各因素极差主次关系以及优化方案, 见表 4。

表3 死区、活塞区体积比例极差和综合评分

Table 3 Range analysis on the volume fraction of dead zone and piston zone and the comprehensive score

项目	K_i	M	N	O	P
死区	K_1	21.30	19.06	19.63	16.13
	K_2	19.00	20.04	18.62	19.00
	K_3	19.60	19.06	19.88	19.32
	K_4	16.69	18.42	18.46	22.13
	R_X	4.61	1.62	1.42	6.01
活塞区	K_1	14.50	15.87	17.47	21.62
	K_2	13.94	16.97	17.69	16.81
	K_3	22.60	20.62	16.32	16.65
	K_4	21.93	19.51	21.50	17.90
	R_X	8.66	4.75	5.18	4.98
综合	K_1	83.20	86.80	87.83	95.49
	K_2	84.94	86.93	89.08	87.81
	K_3	93.01	91.56	86.44	87.33
	K_4	95.24	91.09	93.04	85.76
	R_X	12.05	4.76	6.60	9.73

表4 4 因素极差主次关系和优化方案

Table 4 Four factors in order of precedence and optimizing program

指标	因素极差主次	最优水平号	优化组合	方案
死区体积比例	$R_O > R_N > R_M > R_P$	4441	M4N4O4P1	t37
活塞区体积比例	$R_M > R_O > R_P > R_N$	3341	M3N3O4P1	t38
综合评分	$R_M > R_P > R_O > R_N$	4341	M4N3O4P1	t39

3 底吹气优化试验结果及分析

分别以死区体积比例、活塞区体积比例以及采用综合评分值为指标得到的最优组合方案, 进行优化试验结果验证。各优化方案刺激-响应实验 RTD 曲线如图 1 所示。

根据前文规定以及 RTD 曲线的处理方法计算得到的优化实验相关数据结果见表 5。从表 5 可以明显看出, 底吹气探究实验中方案 t37 是最优方案, 其最佳因素水平组合为 M4N4O4P1, 即吹气量 450 L/h、堰深 110 mm、气盒与堰间距 235 mm 和堰与长水口间距 195 mm。中间包底吹气实质就是在包底设置了一个虚拟的坝, 即气幕挡墙, 气量越大相当于坝越高。而堰与长水口间距小, 如前述会将高速湍流限制在注流区, 使钢液流动平稳, 减小液面波动; 而堰较深、气盒与堰间距大, 这样钢液在包内扩散较好, 到达气幕挡墙处速度慢, 穿透能力弱, 气泡产生的浮力能带动其上升, 从而减少了死区体积比例, 这一点在流场显示时可以清晰地看到。

4 底吹气试验流场显示

底吹气优化方案 t37 流场显示过程中高锰酸钾示踪剂溶液的流动轨迹全程靠近液体表面, 为夹杂

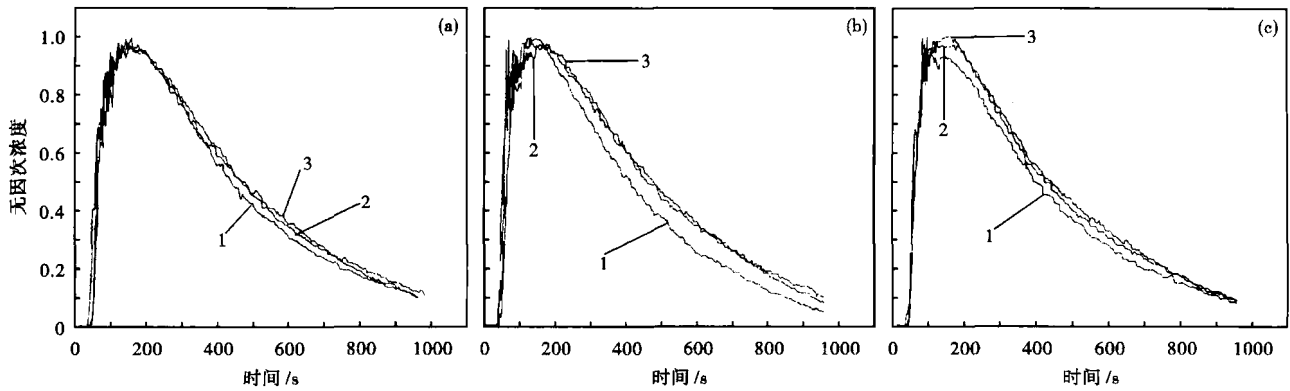


图 1 优化方案 t37(a), t38(b) 和 t39(c) 的停留时间分布曲线

Fig. 1 Curves of residence time distribution of optimizing program t37 (a), t38 (b) and t39 (c)

表 5 水模型底吹气优化实验数据

Table 5 Optimizing test data of water model bottom gas blowing

方案	时间/s			死区体积 比例/%	活塞区体积 比例/%	综合 评分
	滞留	峰值	停留			
t37	38.67	140.00	360.32	11.47	21.95	100.48
t38	36.37	131.33	340.79	16.27	20.64	84.37
t39	36.67	121.33	352.55	13.38	19.41	86.03

物上浮提供了最佳的动力学条件(图 2)。另外可以明显看到气体在抬高钢液的同时,使上升的钢液充分扩散,新注入钢液与包中钢液能充分混匀,从而较大增加新注入钢液在包中的停留时间,这一点也可以在 RTD 曲线的特点上充分印证,底吹气 RTD 曲线普遍圆滑饱满,而且最后的尾巴拉得很长。

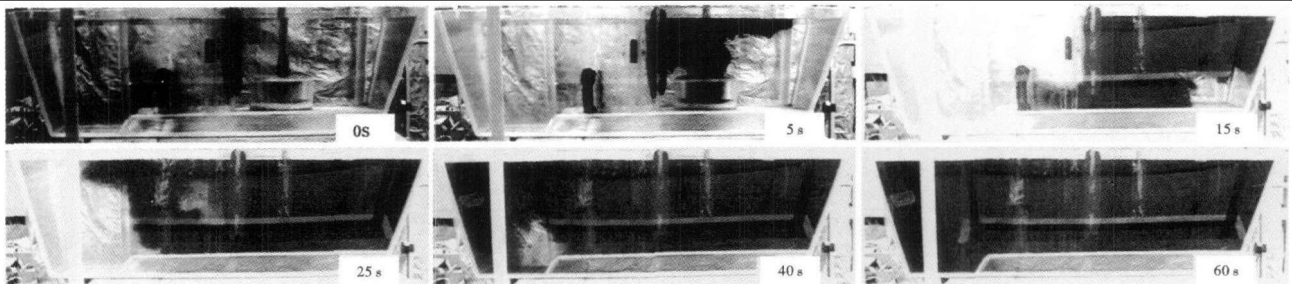


图 2 优化方案 t37 流场显示

Fig. 2 Flow field displaying of optimizing program t37

5 结论

(1) 优化方案 t37 为最佳方案。4 因素的主次关系依次是气盒与堰间距(O)、堰深(N)、吹气量(M)、堰与长水口间距(P);其最佳因素水平组合为 M4N4O4P1,即吹气量 450 L/h、堰深 110 mm、气盒与堰间距 235 mm 和堰与长水口间距 195 mm。

(2) 底吹气探究优化试验最佳方案 t37 平均停留时间达到了 360 s,死区体积比例降至 11.47%,活塞区体积比例提高至 21.95%,综合评分达到 100.48。

- 王立涛,张乔英,李正邦. 中间包内流体流动及夹杂物去除的研究. 炼钢,2005,21(2):26
- 张邦文,邓康,雷作胜,等. 连铸中间包中夹杂物聚合与去除的数学模型. 金属学报,2006,40(6):623
- Wei Zhengyan, Bao Yanping, Liu Jianhua, et al. Orthogonal Analysis of Watermodel Study on the Optimization of Flow Control Decices in a Six-strand Tundish. Journal of University Science and Technology Beijing, 2007, 14(2):118
- 梁福斌,陈健,果晶晶. 板坯连铸中间包水模型研究. 特殊钢, 2008, 29(3):1
- 曹雄,张胤,王永斌,等. 板坯连铸中间包结构优化的水模拟试验研究. 内蒙古科技大学学报,2008,27(4):300

樊文军(1976-),男,硕士,讲师,2000年内蒙古科技大学毕业,冶金过程数值模拟研究。

参考文献

- 张胤,张捷宇,贺友多,等. 宣钢矩形坯连铸机中间包数学模拟研究. 炼钢,2003,19(1):45

收稿日期:2011-06-08