

邯钢 32 t 8 流连铸中间包流场的优化研究

陈军利¹ 郝阳² 李任春¹ 李太全¹

(1 邯钢钢铁集团有限责任公司炼钢厂,邯钢 056015;2 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083)

摘要 利用几何相似比1:3.5建立的水模型和采用正交试验研究了32 t 8流中间包挡墙导流孔位置、孔径、倾角及仰角、挡坝及湍流控制器等因素对平均停留时间、死区比例的影响。实验结果表明,梯形挡墙方案和V形挡墙结构优化方案对滞止时间一致性的都比空中间包和原型挡墙的效果好;V形挡墙的平均停留时间和死区比例优于梯形挡墙;采用挡墙上3个导流孔的高度为500、300、400 mm,孔径80 mm,倾角60°、65°、80°,仰角0°的梯形挡墙方案的综合优化效果较好。脱硫铁水-100 t顶底复吹转炉-LF-CC工业生产试验结果表明采用最佳的V形挡墙方案,铸坯中平均全氧含量由原型中间包的 55.6×10^{-6} 降至 50.5×10^{-6} 。

关键词 32 t 8 流连铸中间包 梯形挡墙 V形挡墙 物理模拟 正交试验 应用

A Study on Optimization of Flow Field in a 32 t Tundish for Eight-Strand Continuous Casting Machine at Hansteel

Chen Junli¹, Hao Yang², Li Renchun¹ and Li Taiquan¹

(1 Steelmaking Works, Handan Iron and Steel Group Co Ltd, Handan 056015; 2 State Key Laboratory of advanced Metallurgical Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The effect of position, diameter, inclination angle and elevation angle of retaining wall guide flow holes, dam and turbulence controller on average residence time and proportion of dead zone in a 32 t tundish for eight-strand casting has been studied with geometry similarity 1:3.5 water model and orthogonal test method. Test results show that the consistence of residence time with using optimized trapezoidal structure and V type structure of retaining wall is better than that of empty tundish and original tundish retaining wall structure; the effect of average residence time and proportion of dead zone with using V type retaining wall is better than that with using trapezoidal retaining wall; the comprehensive effect of trapezoidal retaining wall scheme with height of three flow guide holes-500/300/400 mm, diameter of holes 80 mm, inclination angle 60°/65°/80° and elevation angle 0° is best. The commercial production test by desulphurized metal-100 t top and bottom combined blown converter-LF-CC process indicated that with using the optimized V type retaining wall scheme the average total oxygen content in casting bloom decreases to 50.5×10^{-6} from 55.6×10^{-6} with original tundish.

Material Index 32 t Tundish for Eight-Strand Continuous Casting Machine, Trapezoidal Retaining Wall, V Type Retaining Wall, Physical Simulation, Orthogonal Test, Application

对于多流中间包,理想的情况是从中间包各流出口分配到各结晶器内的钢水应该有相同的温度和清洁度,这就要求多流中间包各流一致性要好^[1-5]。但在实际中间包设计过程中是很难做到的,只能尽可能地使各流接近一致,因此对多流中间包各流一致性的准确的定量分析非常重要,对各流一致性的研究也成为多流中间包的研究重点^[2-3]。为此采用物理模拟的方法对邯钢32 t 8流中间包内的控流装置进行优化实验,确定最优控流装置方案以提高8流中间包各流一致性,提高钢液在中间包内的停留时间,促使大颗粒夹杂上浮排除,保证连铸钢液、铸坯以及最终产品的质量^[6]。

1 实验原理

在水力学物理模拟中,主要是以模型和原型之间的物理相似或几何相似为基础的一种模拟方法,

根据相似原理进行一定的假设,建立物理模型,用水来模拟高温钢液在中间包内的流动行为,保持两个系统的动力学相似和几何相似,因而要求Re准数和Fr准数相等。当流动的Re准数大于第二临界值时,流体的紊乱及流速分布不再变化且彼此相似,与Re准数不再有关,流动进入自模化区域。一般雷诺数第二临界值为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$,计算模型雷诺数 $(Re)_m$ 为 2.3×10^4 ,处于自模化区域因此可以忽略Re准数。

本研究以邯钢8流小方坯连铸机中间包(断面尺寸200 mm×200 mm,拉速1.2 m/s)为原型,其钢水容量为32 t,为水模实验建立1:3.5的中间包有机玻璃模型,用水作为模拟钢液的介质,保证了模型和原型的几何相似和动力相似。由Fr准数相等可以确定模型和实型中流体的速度、流量、平均停留时间的关系。可得:

$$\text{长度 } L_m = \lambda \cdot L_p = 0.286 L_p \quad (1)$$

$$\text{速度 } V_m = \lambda^{1/2} \cdot V_p = 0.535 V_p \quad (2)$$

$$\text{流量 } Q_m = \lambda^{5/2} \cdot Q_p = 0.044 Q_p \quad (3)$$

$$\text{平均停留时间 } t_m = \lambda^{1/2} t_p = 0.535 t_p \quad (4)$$

式中： λ -比例因子； L -几何尺寸； V -流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ； Q -体积流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ ； m, p -模型和原型的下标。

2 实验装置

本模拟系统由上水系统、示踪剂加入系统、数据采集系统和排水系统 4 部分组成，实验装置示意图如图 1。采用有机玻璃制作中间包模型、长水口、下水口、中间包内控流装置（挡墙、挡坝、湍流抑制器、塞棒等），数据采集为 DJ800 型多功能检测仪。

3 实验方法

为了测量停留时间分布，本研究采用“刺激-响应”方法。使用饱和 KCl 溶液作为示踪剂，加入量为 50 mL。当水模型中的流场达到稳定时，加入示踪剂在钢包注流中，用 4 台 DJ800 电导仪测量中间包水口的电导率随时间变化曲线。同时在注流中加入墨汁，用录影设备记录示踪剂在中间包内的运动。

(1) 平均停留时间分析方法。由于组成钢液的物质分子的数目很大，其流动过程所需要的时间必然服从某种概率分布函数，这就是停留时间分布函数 $E(t)$ 。它可以用其数学期望（均值）等数值特征来确定。 $E(t)$ 的均值：

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tE(t) dt / \int_0^{\infty} E(t) dt = \int_0^{\infty} tE(t) dt \quad (5)$$

如果实验中测定的是示踪剂浓度的响应曲线，

$$\bar{t}_c = \int_0^{\infty} tcdt / \int_0^{\infty} cdt \quad (6)$$

如果响应信号不是连续记录而是间歇取样分析的数据， \bar{t}_c 的计算方法：

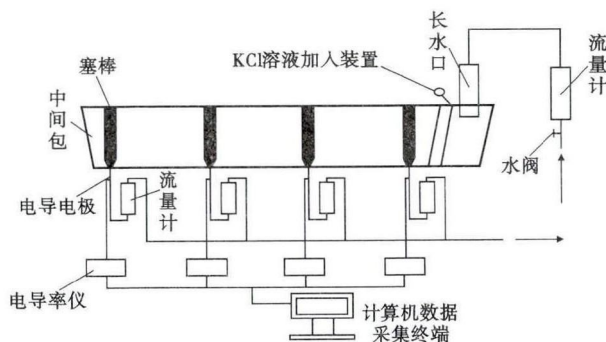


图 1 32 t 8 流连铸中间包水模型实验示意图

Fig. 1 Schematics of water model test of 32 t tundish for eight-strand casting machine

$$\bar{t}_c = \frac{\sum t_i c_i \Delta t_i}{\sum c_i \Delta t_i} \quad (7)$$

当实验时中间包内水的体积为 V ，水的体积流量为 Q 时，由此可算出理论停留时间 t_s ：

$$t_s = \frac{V}{Q} \quad (8)$$

$$\text{活塞流区体积分数: } V_p = (\theta_{\min} + \theta_{\text{peak}}) / 2 \quad (9)$$

$$\text{死区体积分数: } V_d = 1 - \theta_{AV} \quad (10)$$

$$\text{全混流区体积分数: } V_m = 1 - V_d - V_p \quad (11)$$

式中： $\theta_{\min} = \frac{t_{\min}}{t_s}$ ， $\theta_{\text{peak}} = \frac{t_{\text{peak}}}{t_s}$ ， $\theta_{AV} = \frac{t_a}{t_s}$ 。

$$\text{平均停留时间: } t_a = \frac{\int_0^{\infty} tC(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (12)$$

t_{\min} ：从示踪剂的加入到中间包出口处示踪剂开始响应的时间； t_{peak} ：从示踪剂的加入到中间包出口处示踪剂浓度达到最大的时间。

(2) 各流一致性分析方法。目前对于多流中间包还没有一种公认的定量分析各流一致性的方法。本文提出了一种新的各流一致性的定量分析方法，对物理模拟得到的响应曲线进行分析，得到峰值、峰位、半峰宽等参数（图 2）对 8 流中间包各流一致性进行分析研究。

峰值为曲线达到最高处的电压值。半峰宽为峰值高一半处的峰宽度，又称半宽度。即通过峰高的中点作平行于峰底的直线，此直线与峰两侧相交两点之间的时间。峰位为达到峰值的时间。

通过实验得出的 RTD 曲线分析各流的峰值、峰位、半峰宽，并对其求相对标准差（RSD）。相对标准差公式为：

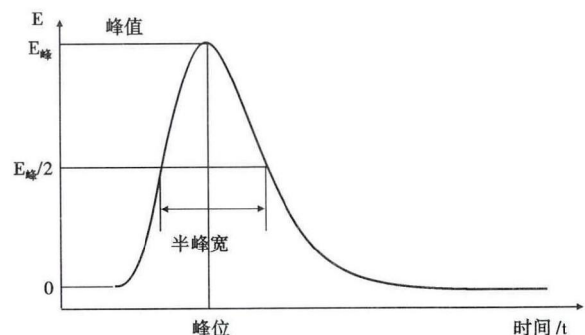


图 2 各参数示意图

Fig. 2 Schematics of each parameter

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

并对计算出各方案的各流峰值、峰位、半峰宽等参数的相对标准差。认为相对标准差越小的方案各流一致性越好。将相对标准差作为定量分析各流一致性的重要指标。

4 实验方案

在中间包内腔结构参数确定的情况下,首先进行空中间包试验和原型控流装置实验,其中原型控流装置为梯形挡墙,然后再进行多孔挡渣墙优化,并最终确定最优的控流装置的结构尺寸。

梯形挡墙及 V 型挡墙示意图分别如图 3(a, b) 所示。

当铸坯断面为 200 mm × 200 mm,拉速为 1.2 m/min,工作液面为 800 mm 以及长水口插入深度为 200 mm 时,考虑挡墙导流孔的位置、孔径、倾角及仰角等因素的变化,进行优化试验,通过电导率仪绘制 RTD 曲线,并综合考虑流场显示确定最佳控流装置方案,实验组如表 1。

5 中间包物理模拟实验结果分析

为了研究 8 流连铸中间包内钢液的流动状态,对电导仪在水口处采集到的电导率数据进行分析,1#~4# 分别代表中间包由中间到一侧的 4 个水口数据的处理结果。

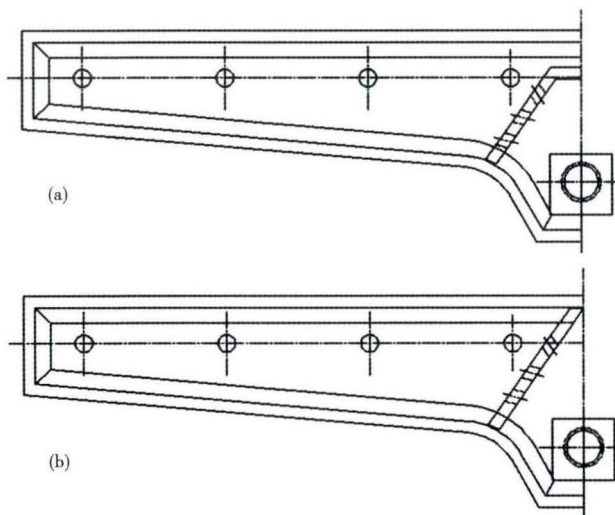


图 3 中间包梯形挡墙(a)和 V 型挡墙(b)示意图
Fig.3 Schematics of trapezoidal retaining wall (a) and V type retaining wall (b) in tundish

表 1 水模型正交试验表
Table 1 Orthogonal test table of water model

墙型	方案编号	挡墙导流孔			
		垂直位置/mm	孔径/mm	倾角/°	仰角/°
梯形挡墙结构优化方案组	1	300/400/500	80/80/80	60/65/80	-
	2	500/300/400	80/80/80	60/65/80	-
	3	400/500/300	80/80/80	60/65/80	-
	4	300/400/500	100/80/60	60/65/80	-
	5	300/400/500	60/80/100	60/65/80	-
	6	300/400/500	80/80/80	57/64/74	-
	7	300/400/500	80/80/80	61/67/85	-
	8	300/400/500	80/80/80	60/65/80	10/10/10
	9	300/400/500	80/80/80	60/65/80	5/10/15
	10	300/400/500	80/80/80	60/65/80	15/10/5
V 型挡墙结构优化方案组	1	300/400/500	80/80/80	60/65/80	-
	2	500/300/400	80/80/80	60/65/80	-
	3	400/500/300	80/80/80	60/65/80	-
	4	300/400/500	100/80/60	60/65/80	-
	5	300/400/500	60/80/100	60/65/80	-
	6	300/400/500	80/80/80	57/64/74	-
	7	300/400/500	80/80/80	61/67/85	-
	8	300/400/500	80/80/80	60/65/80	10/10/10
	9	300/400/500	80/80/80	60/65/80	5/10/15
	10	300/400/500	80/80/80	60/65/80	15/10/5

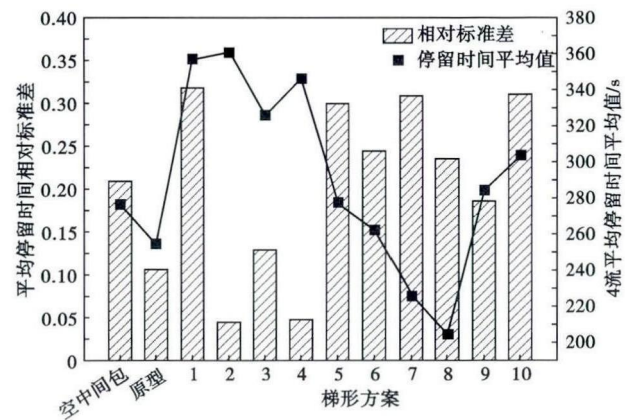


图 4 空中间包、原型中间包和带梯形挡墙各方案中间包平均停留时间相对标准差及平均值

Fig.4 Relative standard deviation and average value of average residence time for empty tundish, original tundish and tundish with trapezoidal retaining wall of each scheme

5.1 梯形挡墙

为了能够更加清楚地分析方案的优劣,分别计算空中间包、原控流装置、梯形挡墙各方案四个出口平均停留时间的相对标准差以及平均值,结果如图 4。

由图 4 可以看出,梯形方案 2 的 4 个水口平均停留时间平均相对标准差较小,也就是一致性较好,并且平均停留时间最大平均值最大,能够获得最长的夹杂物上浮时间。

空中间包、原控流装置、梯形挡墙各方案 4 个出水口死区比例对比见图 5。

由图 5 可以看出,空中间包和原有的控流装置

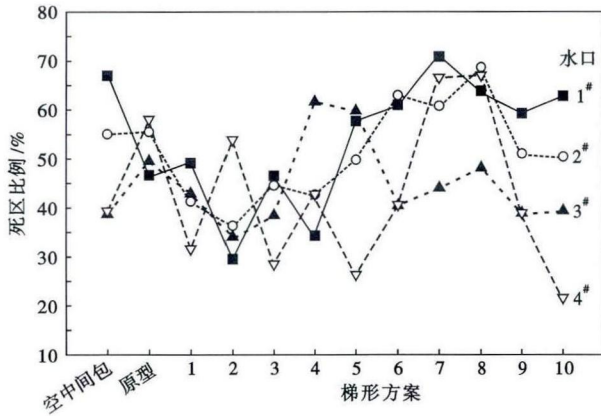


图 5 空中间包、原型中间包和带梯形挡墙各方案中间包死区比例

Fig. 5 Percentage of dead zone for empty tundish, original tundish and tundish with trapezoidal retaining wall of each scheme

各流死区比例均较高,包内流动状态不好。在改变挡墙导流孔的位置、孔径、与挡墙平面的倾角以及与水平面的夹角进行控流装置的优化实验后,发现梯形挡墙方案 2 各流死区比例小。

综合以上分析,在梯形挡墙方案中梯形挡墙方案 2 的综合优化效果最好,梯形方案 2 平均停留时间水口 1#、2#、3#、4# 均在 360 s 左右,而空中间包平均为 240 s,原型平均为 250 s 左右,优化了近 100 s;死区比例方面梯形方案 2 的水口 1#、2#、3#、4# 分别为 29.9%、36.1%、34.1%、53.8%,而空中间包和原型基本都在 50% 左右,优化效果明显。

5.2 V 形挡墙

从图 6 可以看出原型、V 形方案 2 和方案 5 的 4 流平均停留时间相对标准差较小,一致性较好;考虑

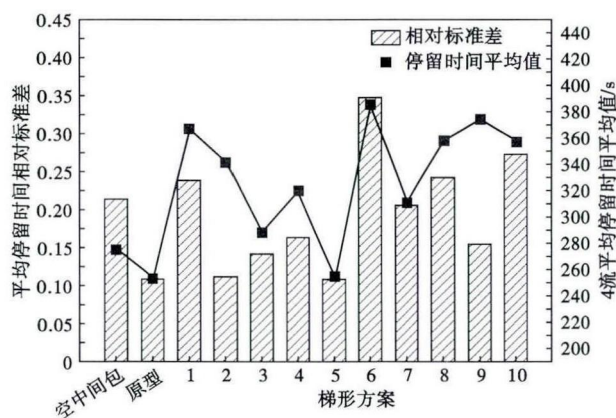


图 6 空中间包、原型中间包和带 V 形挡墙各方案中间包平均停留时间相对标准差及平均值

Fig. 6 Relative standard deviation and average value of average residence time for empty tundish, original tundish and tundish with V type retaining wall of each scheme

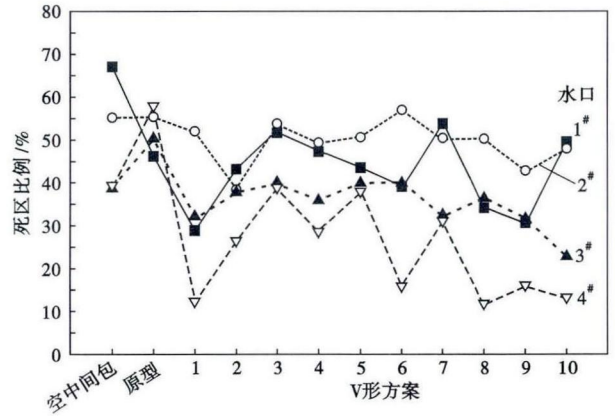


图 7 空中间包、原型中间包和带 V 型挡墙各方案中间包死区比例

Fig. 7 Percentage of dead zone for empty tundish, original tundish and tundish with V type retaining wall of each scheme

平均停留时间的长短,原型及 V 形方案 5 的停留时间最短,V 形方案 9 的停留时间较长并且相对标准差相对于 V 形方案 2 差距不大。所以通过对图 6 的分析,V 形方案 2 和方案 9 为较优方案。

空中间包、原控流装置、梯形挡墙各方案 4 个出水口死区比例对比见图 7。

由图 7 可以看出,在改变挡墙导流孔的位置、孔径、与挡墙平面的倾角以及与水平面的夹角进行控流装置的优化实验后,发现 V 形挡墙方案 9 的死区比例最小,相对于 V 形挡墙方案 2 的 4 流平均死区比例小 6.2%。

综合考虑各流滞止时间一致性、平均停留时间、死区比例等评级指标,V 形挡墙方案 9 控流装置最佳,各流滞止时间一致性最好,即各个出水口温度一致性最好,各流平均停留时间均很长且一致性很好,有利于中间包内钢液的混匀及夹杂物的上浮,死区比例明显降低,中间包内钢液流动状态显著改善。

5.3 梯形挡墙与 V 型挡墙实验结果对比

中间包梯形挡墙方案 2 和 V 形挡墙方案 9 的对比,如表 2 所示。

从表 2 可以看出,原型控流装置效果较差,甚至不如空中间包的各项参数,非常有必要进行优化;梯

表 2 梯形挡墙方案 2 和 V 形挡墙方案 9 效果对比
Table 2 Comparison of effect between trapezoidal retaining wall scheme 2 and V type retaining wall scheme 9

项目	空中间包	原型	梯形挡墙方案 2	V 形挡墙方案 9
滞止时间相对标准差	1.13	1.17	0.75	0.76
平均停留时间均值/s	276	254	360.75	374.5
平均停留时间相对标准差	0.21	0.11	0.044	0.155
死区比例均值/%	50	52	38.3	30.35

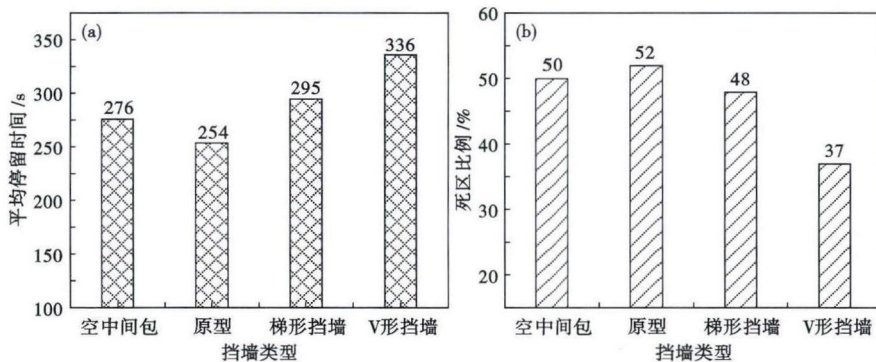


图 8 不同挡墙类型中间包平均停留时间(a)和死区比例(b)

Table 8 Average residence time (a) and percentage of dead zone (b) for tundish with different retaining wall

表 3 原型中间包和改进带 V 形挡墙中间包铸坯的全氧含量
Table 3 Total oxygen content in casting bloom with original tundish and improved tundish with V type retaining wall

挡墙方案	样品编号	全氧含量/ 10 ⁻⁶	全氧平均值/ 10 ⁻⁶	全氧标准差/ 10 ⁻⁶
原型	1	48	55.5	12.6
	2	71	55.5	12.6
	3	60	55.5	12.6
	4	43	55.5	12.6
V 形挡墙 方案 9	5	64	50.5	10.5
	6	45	50.5	10.5
	7	53	50.5	10.5
	8	40	50.5	10.5

形方案 2 和 V 形方案 9 相对于原型装置均有明显的优化效果;V 形挡墙方案 9 除了在平均停留时间相对标准差上低于梯形挡墙方案 2,其余指标项目均优于或相似于梯形挡墙方案 2,所以 V 形挡墙方案 9 除了在平均停留时间一致性上稍差,在各流响应时间一致性、夹杂物上浮去除、死区比例上均有较好的优化效果,为所有实验方案中的最优方案。

对比中间包梯形挡墙和 V 形挡墙的优化效果,方案的平均值如图 8 所示。

分别计算空中间包、原型、V 形方案、梯形方案的平均停留时间以及死区比例的平均值,结果如图 8(a,b),可以发现原型控流装置存在较大的问题,梯形挡墙方案及 V 形挡墙方案对于中间包的冶金效果有明显的提升;V 形挡墙方案整体在死区比例上是低于梯形挡墙方案的,而在停留时间上整体是高于梯形挡墙方案的,说明从整体效果上来说,V 形挡墙方案是优于梯形挡墙方案的。

6 工业实验

根据物理模型实验的结果,对工业中实际使用的挡墙进行了改进,改进方案为 V 形挡墙方案 9。

实验钢种为 SAE1008 冷镦钢,工艺流程为:脱硫铁水→100 t 顶底复吹转炉→LF 精炼→小方坯连铸机。为了验证改进方案的效果,仅对一侧的中间包按照 V 形挡墙方案 9 进行改进,另一侧中间包仍为原型方案。为了验证改进方案对于钢水一致性的优化效果,通过测量铸坯的全氧含量,对比两个方案各流的洁净度。在浇铸稳定后的正常坯的相同位置取气体样,分别测量 8 流连铸坯对

应样品的全氧含量,测量结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,在对中间包控流装置进行改进后,各流铸坯的洁净度有所提高,并且各流洁净度标准差有所降低,说明各流一致性提高。实验结果说明改进的控流方案可以提高中间包的冶炼效果。

7 结论

(1)原有的控流装置相对于空中间包在各水口相应时间、停留时间一致性及死区比例上并没有改善,有必要进一步优化。

(2)综合考虑各流滞止时间一致性、平均停留时间、死区比例等评级指标,V 形挡墙方案 9 控流装置效果最佳,并且通过现场实验证明了该方案的有效性。

(3)V 形挡墙在平均停留时间方面、死区比例方面整体优化效果优于梯形挡墙。

国家自然科学基金资助项目(No. 51404022)

参考文献

- [1] 杨云周,艾新港,沈明钢,等.六流中间包钢液流动行为水模实验研究[J].冶金能源,2011,30(1):12-15,42.
- [2] 王建军,包燕平,曲英.中间包冶金学[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [3] 韩建军,范新有,李士琦,等.5流中间包内钢液流动特性的优化[J].过程工程学报,2011,11(2):193-198.
- [4] 许福源,汪建新.八流小方坯中间包结构优化[J].包钢科技,2011,37(2):22-24.
- [5] 史宸兴.实用连铸冶金技术[M].北京:冶金工业出版社,1998.
- [6] 唐海燕.连铸中间包内部结构优化的数理模拟及冶金效果[J].北京科技大学学报,2009,31(1):38-42.

陈军利(1973-),男,硕士(2010年河北联合大学),副厂长,1996年内蒙古科技大学(本科)毕业,洁净钢生产技术研究。E-mail:347465760@qq.com

收稿日期:2016-08-22