

· 试验研究 ·

4流大方坯45 t中间包流场的物理模拟和冶金效果

安航航¹ 韩传基¹ 陶金明¹ 司马锦² 孙彦辉² 李博³

(1 中冶连铸北京冶金技术研究院,北京 100028; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083;

3 湖北新冶钢有限公司炼钢事业部转炉分厂,黄石 435001)

摘要 通过几何相似比1:3的水模型对钢厂4流410 mm×530 mm大方坯连铸机的不同结构的40~50 t中间包进行流场、温度场以及流动特征的研究,并得出最佳控流装置。研究表明,为满足4流大方坯中间包对流场的要求,有通道式感应加热装置的中间包与无通道式感应加热装置的中间包优化出的最佳控流装置不同。对于无通道式感应加热装置的中间包,采用最佳方案(湍流控制器+带导流孔的“V”型挡渣墙+挡坝组合的控流方式),延长了近流水口响应时间及平均停留时间,各水口钢液的流动模式趋于一致,中间包内钢液的流动特征得到明显改善。生产40Cr钢实践表明,可连浇8炉,各水口最大温差为4℃,中间包钢液中T[O]约为 10×10^{-6} 。

关键词 大方坯 中间包 感应加热 物理模拟 冶金效果

Physical Simulation of Liquid Flow Field in 45 t Tundish for Four Strand Bloom and Its Metallurgical Effect

An Hanghang¹, Han Chuanji¹, Tao Jinming¹, Sima Jin², Sun Yanhui² and Li Bo³

(1 Beijing Metallurgical Technology Research Institute, CCTEC, Beijing 100028,

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

3 Converter Plant, Steelmaking Division, Hubei Xin Yegang Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract A study on liquid flow field, temperature field and flow characteristics in a 40~50 t tundish with different structure for 4-strand 410 mm×530 mm bloom caster at steel works has been carried out by using geometric similarity 1:3 water model to get optimum flow control devices. Research results show that in order to meet the requirement of flow field in tundish for 4-strand bloom, the optimized best flow control device for the tundish with channel type induction heating unit is different from that for the tundish without channel type induction heating unit. For the tundish without channel type induction heating unit, by using the optimum scheme i. e. the combined flow control method of turbulent flow control device + “V” type retaining wall with deflector hole + dam, the response time and average residence time of the flow closer to nozzle are prolonged, the flow pattern of each nozzle is consistent, the liquid flow characteristics in tundish are obviously improved. The practice in production of steel 40Cr shows that continuous casting heats are up to 8 heat, extreme temperature different between each strand decreases to 4℃ and T[O] in liquid in tundish is about 10×10^{-6} .

Material Index Bloom, Tundish, Induction Heating, Physical Simulation, Metallurgical Effect

中间包内钢液的流动对夹杂物的去除有很大的影响,钢液的流动与温度相互影响,钢液的温度直接影响中间包内钢液的流动,耐火材料的侵蚀损耗以及非金属夹杂物的上浮排除^[1]。相比其他中间包冶金技术,钢水控流技术有两个优点:(1)成本低,见效快,效果明显;(2)技术成熟,可操作性强^[2]。

针对钢厂新设计的4机4流大方坯连铸机中间包,通过水模型实验,对中间包内钢液的流动特征进行系统的研究,优化流场,从而达到均匀温度以及促使钢液中夹杂物充分的上浮,以满足铸坯质量和连铸工艺顺行的要求,并最终设计出新的控流装置。

连铸机的主要技术参数为:(1)铸机断面410 mm×530 mm;(2)弧形半径16.5 m;(3)流间距2100 mm;(4)中间包容量40~50 t;(5)主要生产合金结构钢、齿轮钢等。

1 物理模拟研究方法

1.1 实验原理

根据几何相似和动力学相似原理,考虑到各种因素,选取水模型(L_m)实际模型(L_s)的几何相似比 $\lambda = 1:3$;动力学相似要求模型与实型中流体的雷诺准数 Re 和弗鲁德准数 Fr 相等。对于动力学相似,根据本次实验条件计算,二者都在第二自模区内,该系统的流动状态及流速分布与雷诺准数 Re 无关,只要保证与重力有关的弗鲁德数相等($F_{r_m} = F_{r_s}$)即可满足相似条件:

$$u_m^2/g_m L_m = u_s^2/g_s L_s$$

式中: u - 流体速度/($m \cdot s^{-1}$); L - 特征长度/m; g - 重力加速度/($m \cdot s^{-2}$); m - 表示模型; s - 表示实际。上式可写成:

$$L_m/L_s = (u_m/u_s)^2, L_m/L_s = \lambda$$

则速度比 $u_m/u_s = \lambda^{1/2}$,

流量比 $Q_m/Q_s = \lambda^{5/2} = 0.064$

本次实验采用同一配合拉速:0.48 m/min,根据 $Q_m/Q_s = \lambda^{5/2}$ 得 $Q_m = 0.40 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

1.2 实验装置

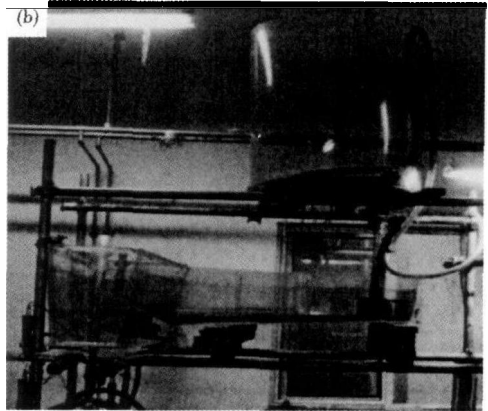
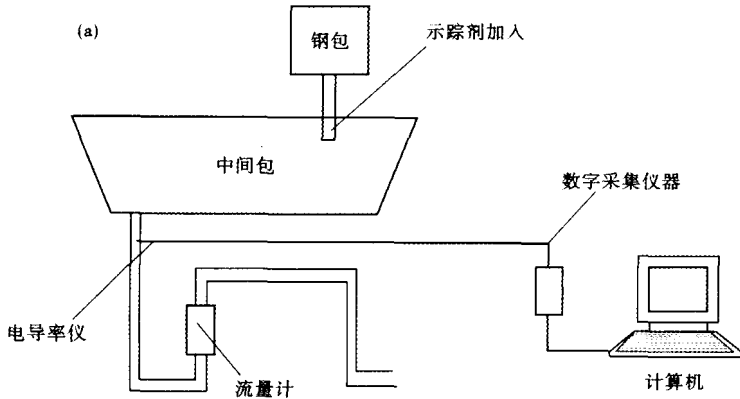


图 1 模拟实验装置示意图(a)和实际图(b)
Fig.1 Schematics (a) and actual figure (b) of simulated test device

根据刺激响应原理,在连续流动的钢包注流中,当中间包的液面稳定后以脉冲方式定量加入示踪剂(饱和 KCl 溶液),同时在中间包出口处利用电导率仪、计算机及数据采集系统测定示踪剂浓度随时间的变化曲线,从而得到流体在中间包内的停留时间分布(RTD),通过对 RTD 曲线进行分析计算,可以得到流体在中间包内的平均停留时间($\bar{\tau}$),滞止时间(τ_s),峰值时间(τ_m),根据描述中间包内钢液流动的修正混合模型,可计算活塞区体积分数(V_p/V),全混区体积分数(V_m/V)和死区体积分数(V_d/V)。这些参数是评价中间包内流场好坏以及夹杂物上浮几率的重要指标。一般停留时间长,滞止时间长,死区体积分数小,有利于中间包内钢液的混匀和夹杂物上浮去除^[3,4]。

(1) 钢水实际平均停留时间(t_f)。钢水实际平均停留时间计算公式为:

$$t_f = \frac{\Delta\tau \sum_{i=1}^n iC_i}{\sum_{i=1}^n C_i}$$

式中: C_i - 各水口出示踪剂的浓度; i - 采样次数; $\Delta\tau$ - 采样时间间隔。

(2) 理论平均停留时间(t_0)。本实验理论平均停留时间(单个水口)计算公式为:

$$t_0 = V_0 / (4Q_0)$$

式中: t_0 - 理论平均停留时间/s; V_0 - 中间包总体积/ m^3 ; Q_0 - 中间包水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ 。

(3) 活塞区体积分数(V_p/V)、全混区体积分数(V_m/V)、死区体积分数(V_d/V)的计算公式分别为:

$$V_p/V = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2t_0} = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2} \text{ (活塞流区体积分数)}$$

$$V_d/V = 1 - \frac{t_f}{t_0} = 1 - \theta_f \text{ (死区体积分数)}$$

$$V_m/V = 1 - V_p/V - V_d/V \text{ (混流区体积分数)}$$

式中: t_{\min} - 滞止时间; t_{\max} - 电导率最大的时间。

本实验利用 DJ800 水工测量仪对水的流动进行模拟监测,每次采样时间为1 500 s,采样间隔时间为 0.5 s,每个工况连续测 3 次,然后取平均值作为研究数据。在计算机数据采集完成后,通过颜色示踪法进行中间包流场显示,向中间包内脉冲加入 500 mL 自来水和大约 30 mL 的墨水,用高速摄像机来观察中间包内颜色示踪剂的流动轨迹。由于选用的示踪剂(KCl)与水的跟随性好,示踪剂的流动趋向可有效地反映中间包内流体的流动。

1.4 实验方案

要满足 4 机 4 流中间包内钢液的流场和温度场

合理的要求,在中间包加湍流控制器的基础上针对带感应加热装置和不带感应加热装置两种情况设计 3 种方案:沟槽通道(无挡渣墙和挡坝),最优沟槽通道 + 挡渣墙挡坝(无感应加热装置)和圆形通道 + 挡渣墙挡坝(带感应加热装置),并在以上各方案内设计优化方案,共计 23 组实验:

方案一,中间包在加湍流控制器的基础上,在冲击区与浇注区之间的空包区设计一个沟槽,沟槽位于中心部位,沟槽的底部与带感应加热的中间包的两条通道的底部位置相同,底部宽度分别为 200、250、300、350 mm,沟壁坡度与内衬其它部位一致,高度与中间包高度一致。图 2(a)为无感应加热装置的中间包结构图,图 2(b)为带感应加热装置的中间包结构图,图 3(a)为设计的沟槽的主视图。

方案二,在优化的沟槽的基础上,设置挡渣墙和挡坝。在 2# 和 3# 水口之间设置斜 V 字形挡渣墙,带单导流孔(注:图 2(a)中水口编号从左到右依次为 1#、2#、3#、4#),且在 1# 和 2# 水口之间,3# 和 4# 水口之间有挡坝。挡渣墙和挡坝的结构如图 3(b)所示,湍流控制器结构如图 3(c)所示。挡渣墙与靠近塞棒的包壁的夹角为 50°,且浸入式水口的中心到挡渣墙的垂直距离为 360 mm。挡渣墙高度为 950 mm,导流孔中心固定不变,导流孔孔径分别为 110、130、150 mm。竖直方向导流孔中心距挡渣墙下底为 520 mm,水平方向导流孔中心距中心线距离为 320 mm。导流孔垂直向上 10°,水平方向偏角与包壁平行。挡坝高度分别为 300、350、400 mm,两个挡坝分别距 2# 和 3# 距离为 1 150 mm。

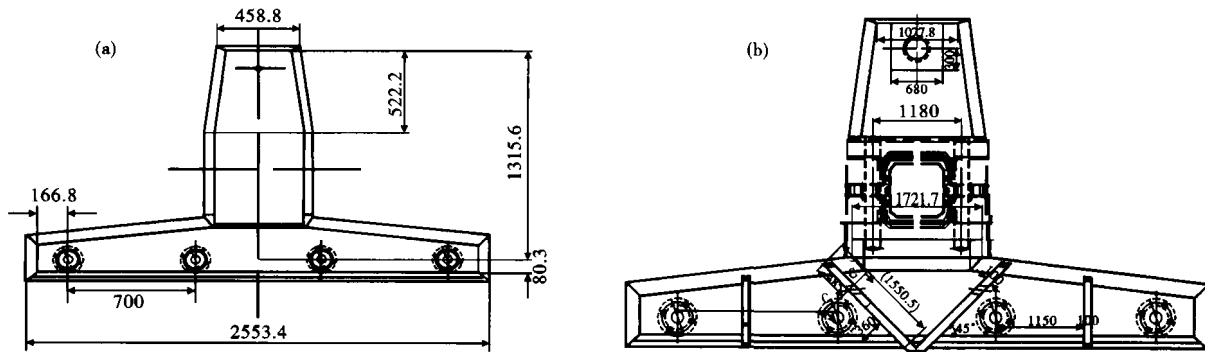


图 2 无感应加热装置(a)和带感应加热装置(b)的中间包结构图
Fig. 2 Structure diagram of tundish without induction heating unit (a) and with induction heating unit (b)

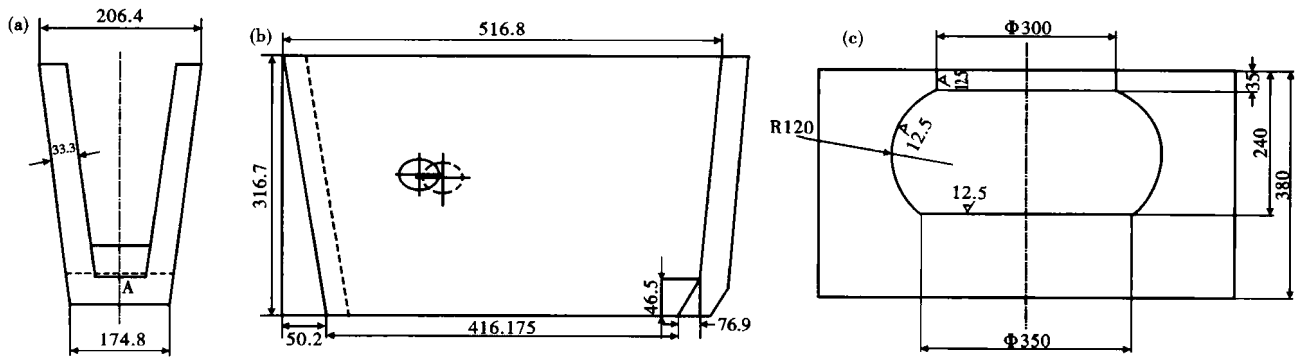


图 3 设计的沟槽(a)、左侧挡墙(右侧呈对称状)(b)和湍流控制器简图(c)
Fig. 3 Diagram of designed groove (a), left side wall (right side wall being symmetric) (b) and turbulent controller (c)

方案三,在带感应加热装置的基础上,挡渣墙和挡坝的设置与方案二相同。

2 实验结果与分析

2.1 物理模拟结果

本实验共计 23 组方案,由于方案众多,无感应

加热的中间包仅对空包(方案 a)(无感应加热装置)、采用单独沟槽的最优方案(方案 b)(无感应加热装置)、最优沟槽 + 挡渣墙和挡坝(无感应加热装置)的最优方案(方案 c)、圆形通道 + 挡渣墙和挡坝(有感应加热装置)的最优方案(方案 d)等共计 4 组

方案的实验结果进行分析讨论。

从图 4 可知,对于方案 b,由于在浇注区没有控流装置,流体注入中间包冲击区的流速较高,在下降过程中卷入周围的液体,当沿沟槽通道进入浇注区到中间包底部迅速向四周呈散射状散开,一部分液体碰到包壁后迅速上翻,一部分流体由于没有任何阻挡,且沿着包底流动,直接流向 1# 和 2# 水口,形成短路流,将夹杂带进结晶器。而对于方案 c 和方案 d,由于设置了带导流孔的挡渣墙和挡坝,流体经导流孔通过射流的方式以较大的流速向斜上方流出,与包壁碰撞后返回,流向 1# 水口,部分流体经挡坝的阻挡作用流向 2# 水口。带导流孔的挡渣墙和挡坝对流场有明显的改善,延长了流体停留时间,减轻短路流现象,有利于温度均匀和夹杂物去除。

从表 1 和图 5 可知:

(1) 在无控流模式下(空包-方案 a)(无感应加热装置),中间包内钢液两流的平均停留时间较短,1 流和 2 流的死区比例达到 54% 和 60%,根据方差分析,1 流和 2 流钢水的滞止时间和平均停留时间的平均标准差为 28.1 和 19.5,两流的流动特性参数差异是较大的,两者不均匀;两流的 RTD 曲线都比较陡,存在双峰,且两流的曲线变化不一致,短路流严重。根据以上的分析,说明 4 流钢液的流动特性是不合理的,会造成两流的钢水温度存在差异,不利于生产过程的稳定和顺行。

(2) 采用单独沟槽的最优方案(方案 b)(无感应加热装置),两流的平均停留时间延长了 17 s,增加了 5.4%,1 流和 2 流的死区比例减小到 49%,根据方差分析,两流的滞止时间的平均标准差有一定程度的减小,平均停留时间的平均标准差有明显的减小;从图 5 可知,两流的 RTD 曲线的变化趋于一致,但仍存在双峰,说明仍然存在一定的短路流。

(3) 对于采用最优沟槽 + 挡渣墙和挡坝(无感应加热装置)的最优方案(方案 c),相对于方案 a,

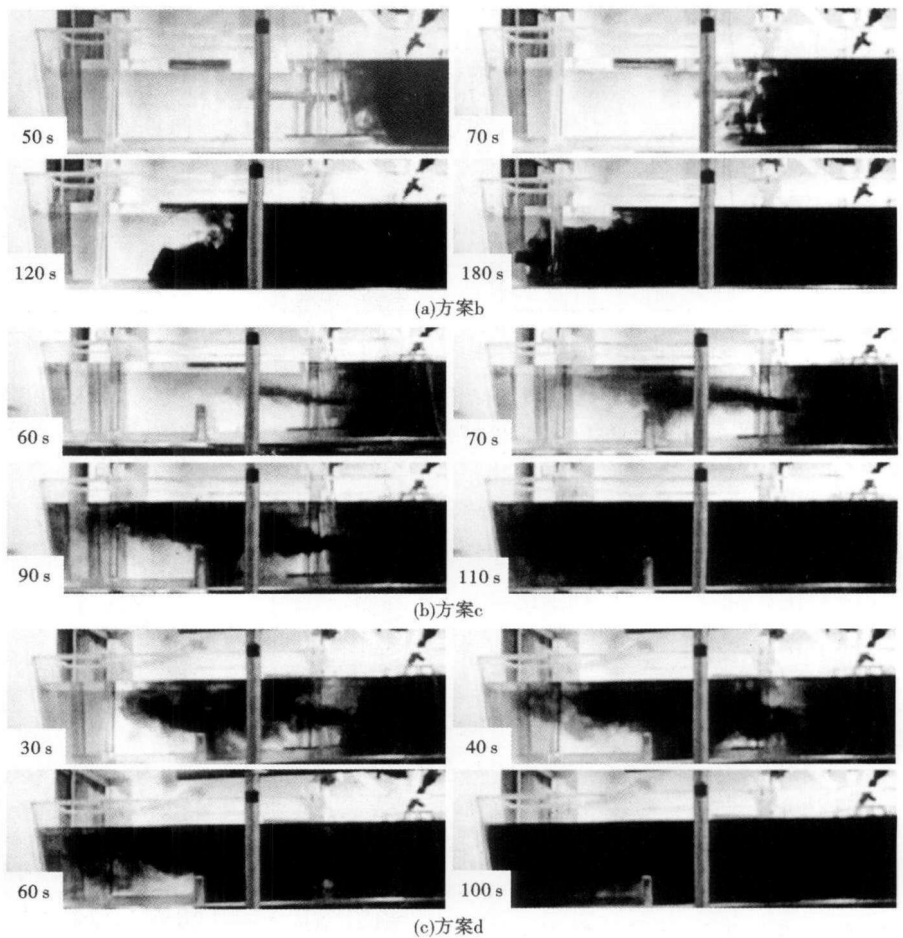


图 4 中间包内流体的流场图控制装置:(a)方案 b,最优单独流槽无感应加热;(b)方案 c,最优沟槽 + 挡渣墙和挡坝,无感应加热;(c)方案 d,圆形通道 + 挡渣墙和挡坝,有感应加热
Fig. 4 Shot of liquid flow field in tundish with control flow device: (a) scheme b- optimum single groove, without induction heating unit, (b) scheme c- optimum groove + retaining wall and dam, without induction heating unit, and (c) scheme d- round channel + retaining wall and dam, with induction heating unit

表 1 典型方案实验结果
Table 1 Experimental result of typical schemes

方案	水口	t_{\min}/s	t_f/s	$(V_d/V)/\%$	$S_{t_{\min}}/s$	S_{t_f}/s
a	1#	108	334	54	28.1	19.5
	2#	52	295	60		
b	1#	97	333	49	23.6	1.8
	2#	50	330	49		
c	1#	100	516	21	2.2	9.5
	2#	96	534	18		
d	1#	63	527	14	1.5	4.4
	2#	66	535	12		

注: $S_{t_{\min}}$ -各流滞止时间的均方差; S_{t_f} -各流平均停留时间的均方差,两个参数是用来衡量各流流动一致性的评价参数。

第 1 流和第 2 流的平均停留时间有很大幅度的提高,分别增加了 182 s 和 239 s,第 1 流的滞止时间减小了 8 s,第 2 流的滞止时间增加了 44 s。根据方差分析,1 流和 2 流钢水的滞止时间和平均停留时间的平均标准差为 2.2 和 9.5,两流的流动情况趋于

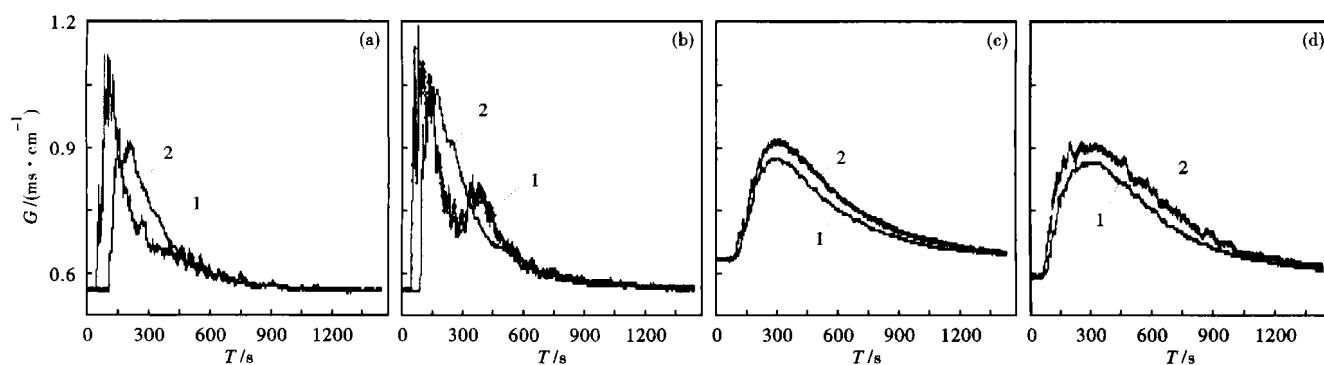


图5 方案 a(a); 方案 b(b); 方案 c(c); 方案 d(d) 的 RTD(停留时间分布) 曲线

Fig. 5 RTD (Residence Time Distribution) curves of scheme a (a), scheme b (b), scheme c (c) and scheme d (d)

一致,中间包内钢液的死区比例减小到 20%;曲线变得平滑,峰值时间延长,两流的 RTD 曲线的变化几乎完全相同。与方案 b 相比,方案 c 对没有感应加热的中间包内钢液的流动和流动模式的改善效果最为明显。

(4)对于采用圆形通道+挡渣墙和挡坝(有感应加热装置)的最优方案(方案 d),相比于方案 b,1流和2流的平均停留时间至少增加了 60%,滞止时间有一定程度的减小,根据方差分析,1流和2流钢水的滞止时间和平均停留时间的平均标准差为 1.5 和 4.4,两流的流动情况趋于一致,中间包内钢液的死区比例减小到 13%;曲线变得平滑,峰值时间延长,两流的 RTD 曲线的变化几乎完全相同。采用方案 d 对采用中间包感应加热的 4 流大方坯中间包钢液的流动和流动模式的改善效果最为明显。

根据图 4、图 5 以及表 1 可知,带导流孔的挡渣墙和挡坝对流场有明显的改善,整个浇注区钢液的流动比较平稳,不存在短路流的现象,且钢液表面稳定,钢液通过经斜向上的导流孔以射流的方式流出,且由于挡坝的设置,使钢液在中间包内的流动路线延长,对应的停留时间增加,并且各流速度差异减小。中间包死区比例降低,这种流动状态将有利于均匀钢液成分和温度,提高各流铸坯质量的均匀性。

3 冶金效果

带有感应加热装置的中间包在生产中预留,对于不带感应加热装置的中间包采用方案 c(最优沟槽+挡渣墙和挡坝的控流装置)为最优方案,不带感应加热装置的中间包于 2011 年 5 月投入使用,中间包在生产中的使用效果很好,浇注钢种为 40Cr,在浇注过程中对中间包的钢水温度进行实测,各流(第 1 流与第 2 流)水口最大温差为 4℃,连浇 8 炉

后中间包内的控流装置完好无损,且中间包钢液中 T[O] 约为 10×10^{-6} 。

4 结论

(1)不加控流装置时,中间包钢液平均停留时间短,各流流动特性的一致性较差,中间包死区较大。

(2)“湍流控制器+V型多孔挡渣墙+挡坝”的控流方式明显延长了滞止时间和平均停留时间,平均停留时间增加了 60%,死区体积分数降低了 50%~70%,极大在改善了各流流动特性的一致性。

(3)推荐方案 c 和方案 d 分别为有通道式感应加热装置的中间包与无通道式感应加热装置的中间包控流装置的最佳方案。

(4)对于不带感应加热装置的中间包,采用方案 c(最优沟槽+挡渣墙和挡坝的控流装置)在生产中应用效果很好,各流(第 1 流与第 2 流)水口最大温差为 4℃,连浇 8 炉后中间包内的控流装置完好无损,且中间包钢液中 T[O] 约为 10×10^{-6} 。

参考文献

- 1 张炯明,邓凤琴,王文科,等.连铸中间包钢水夹杂物浓度的数值模拟.北京科技大学学报,2004,26(3):247
- 2 刘旭峰,周俐,王建军,等.六流小方坯连铸中间包内型优化设计水模研究.安徽工业大学学报,2002,19(1):26
- 3 齐新霞,包燕平.六流方坯中间包流场的物理模拟和冶金效果.钢铁研究学报,2002,18(1):12
- 4 金友林,包燕平,李志斌,等.板坯连铸单流中间包控流装置优化模拟研究.炼钢,2009,25(2):49

安航航(1984-),男,硕士,助理工程师,北京科技大学毕业,炼钢、连铸工艺技术研究。

收稿日期:2011-09-29