

5 流连铸中间包新型导流结构钢水流场的模拟研究

崔阳 赵巍 刘海啸
(辽宁科技大学材料学院,鞍山 114051)

摘要 采用1:3水力学模型和数值模拟研究了常用的直和圆弧形导流墙结构和新型优化直和圆弧形导流墙加导流管结构的中间包钢水流场的特性。结果表明,优化的中间包结构提高了水口处钢水平均停留时间、响应时间和峰值时间,各个水口之间钢水的最大停留时间的差别也有所减小,明显改善了中间包的冶金效果。

关键词 中间包 导流管挡渣墙结构 水力学模型 数值模拟

Simulation Study on Liquid Field in Tundish with New Control Flow Device for 5- Strand Casting

Cui Yang, Zhao Wei and Liu Haixiao
(School of Materials, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract Characteristics of liquid field in tundish with the straight and curved weir and dam in common use and the new optimized straight and curved weir and dam with guiding flow tube device have been studied by using 1:3 water model and numerical simulation. Results showed that average residence time, response time and peak time of liquid steel at nozzle increased by using optimized device in tundish, and difference of maximum residence time of liquid steel between each nozzle decreased in some extent which obviously improved metallurgy effect in tundish.

Material Index Tundish, Structure of Weir and Dem with Guiding Flow Tube, Water Model, Numerical Simulation

中间包内钢水的流动状态对延长钢水在中间包内的停留时间、减少卷渣和改善夹杂物的上浮排出都有重要作用,它将直接影响到铸坯的质量。而其合理的内部结构能有效延长钢水的平均停留时间,减小各流出口钢水的温度和停留时间差异,对改善中间包内的流场和温度场起着至关重要的作用。

本文通过分析对比以往中间包的内部结构形状的基础上,总结各种中间包结构的优缺点,结合目前的生产实际条件,对5流中间包的内部结构加以改进优化,进而找到更加合理的内部结构。

1 研究方法及方案

采用水模型实验和数值模拟实验,对平均停留时间分布曲线和流场分布情况的分析对比,得到不同形式下中间包内钢水流动情况优劣。选取的研究对象为5流小方坯连铸中间包对称布局,中间包包壁倾角为 9.9° ,水口在中间包长度方向的间距离为1401 mm。表1中列出了中间包原型及模型的一些主要技术参数。对中间包不同的4种控流模式进行实验,前2种是经常采用的导流墙形式,另外2种加上了导流管的新型结构,导流墙的导流孔及导流管

的开口都开在中间包工作液面范围内,向上倾斜以获得表面流股,而且开在挡板的远离水口的半侧以便消除短路流股。导流管形式的中间包用导流管把中间包分成了两个工作区,两区通过导流管连接通,导流管两工作区的开孔高度应保持相同,避免钢渣流入下工作区。实验时取模型(L_m)和实型(L_r)的几何相似比为1:3,将中间包系统近似看作是恒温系统。考虑到中间包左右对称性,只测量了3个水口,其方案如图1所示。

2 水力学模拟实验

2.1 实验原理

中间包内钢水的流动,一般可视为粘性不可压

表1 中间包模型及原型的主要参数表

Table 1 Main parameters of prototype tundish and water model

项目	参数	
	原型	模型
工作液面高度/mm	742	247
入水口内径/mm	72	24
入水口的流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	25.2	1.61
入水口插入深度/m	200	67
有效容积/ m^3	3.76	0.139 3

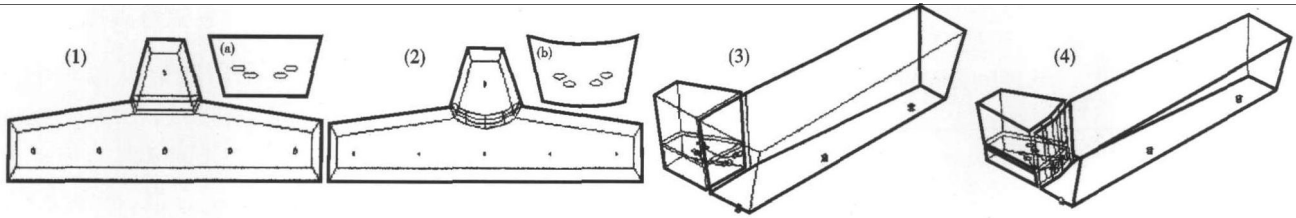


图1 各方案中间包示意图:(1)直形导流墙,(a)导流孔;(2)圆弧形导流墙,(b)导流孔;(3)直导流墙加导流管;(4)圆弧形导流墙加导流管
Fig.1 Schematic diagram of tundish of each scheme: (1) straight weir and dam, (a) guiding hole; (2) curved weir and dam, (b) guiding hole; (3) straight weir and dam with guiding tube; (4) curved weir and dam with guiding tube

缩稳态流动,同时可以忽略化学反应的影响。因此系统只要满足几何相似、运动相似和动力学相似就可以满足模型和原型的相似。根据流体力学原理,当流体流动的 Re 准数处于第2 临界值时,流体的湍动程度及流速的分布几乎不再受 Re 数的影响。在中间包模型与实际生产使用的中间包中的流体流动状态均处于第2 自模化区时,只要保证弗鲁德准数 Fr 相等即可。本实验亦是如此,为此得到模型与原型的体积流量和速度及时间之间的关系为:

$$\text{速度比: } \frac{V_m}{V_r} = \sqrt{\frac{L_m}{L_r}} = \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.577 \quad (1)$$

$$\text{流量比: } \frac{Q_m}{Q_r} = \frac{V_m L_m^2}{V_r L_r^2} = 0.064 2 \quad (2)$$

平均停留时间比:

$$\frac{\bar{t}_m}{\bar{t}_r} = \frac{L_m/V_m}{L_r/V_r} = \frac{L_m V_r}{L_r V_m} = 0.577 \quad (3)$$

式中: m - 模型; r - 原型; λ - 比例系数; L - 模型尺寸; V - 速度; Q - 体积流量; \bar{t} - 平均停留时间。

2.2 模型分析

对于多流连铸中间包,理想的情况是从各出水口流出的钢水在中间包内具有相同的流动特征,即应有相同的响应时间 T_r 、停留时间 T_a 和钢水温度等,从而保证生产的顺行、铸坯质量的提高。但这样的情况在中间包设计的过程中是很难得到的,只能使它们尽可能地接近,避免过度分散。本文采用标准差来考察它们的分散程度^[1]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (4)$$

式中: S - 标准差; x_i - 第 i 个样本值, $i = 1, 2, 3$; \bar{x} - 表示样本的算术平均值; N - 样本个数, $N = 3$ 。

S 值越大,说明所考察参数的离散程度也越大,各流的流动状况越不一致。所以,对于连铸中间包来说,所考察参数的 S 值越小,说明各流的流动特性越接近^[2]。各流的流动特征越趋于一致,夹杂物就越易于上浮和排除,钢水在中间包内的滞流也会减小,新老钢水的混合加快,各流钢水温度也越均匀。为此,提出几点中间包的优化设计原则:

- (1)适当延长近流的响应时间,缩短远流的响应时间;
- (2)降低各出水口响应时间 T_r 、浓度峰值时间 T_p 对应的标准差 S_{T_r} 、 S_{T_p} ;
- (3)延长各流平均停留时间和整体平均停留时间 T_a ,并且尽量降低各出水口的平均停留时间的标准差 S_{T_a} ;
- (4)增加中间包内平均活塞流区体积比率 V_p ;
- (5)减小死区体积分比率 V_d 、增加平均活塞流区体积比率 V_p 、增加活塞流与死区体积比 R_{V_p/V_d} 。

2.3 实验结果及分析

从表2 和表3 可以看出,在只有带孔挡墙模式下,中间包内流体的最大平均停留时间差 ΔT_a 较大,活塞区与死区体积比率 R_{V_p/V_d} 占63%左右, S 值的离散程度也很大,1#、2#、3#水口的流动状况差距较大,3#水口容易产生死区,不利于钢水温度成分的均匀分布和夹杂物上浮,钢水在中间包内的流动状况不够合理。中间包内加设了导流管后,实验数据显示中间包的流动模式得到了不同程度的改善。与只有导流墙模式的中间包相比,中间包的响应时间和平均停留时间都有所增加,特别是4号方案,对流体流场和流动模式改善效果最为明显。虽然,活塞区变

表2 中间包水模型的部分实验数据

Table 2 Part experimental data of tundish water model

方案	平均停留时间 T_a/s			响应时间 T_r/s			峰值时间 T_p/s			最大平均停留时间差 $\Delta T_a/s$
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	1#	2#	3#	
1	259	228	205	40	18	10	123	66	49	54
2	256	228	203	38	17	9	121	68	52	53
3	250	237	214	33	22	16	112	71	56	36
4	251	239	217	32	21	17	110	74	57	34

注:1#、2#、3#为水口。

表 3 不同控流装置水模型的相关试验参数及标准差值

Table 3 Relative test parameters and standard deviation of water model with different control flow device

方案	有效容积(V)/ m^3	V_d	V_p	V_m	$R_{Vp/Vd}$	S_{Tr}	S_{Tp}	S_{Ta}
1	0.139 3	0.256	0.164	0.580	0.640	15.5	38.8	27.1
2	0.139 3	0.261	0.164	0.575	0.628	14.7	36.1	26.5
3	0.133 0	0.213	0.174	0.613	0.817	8.62	28.9	18.2
4	0.132 0	0.204	0.175	0.621	0.858	7.76	27.1	17.2

化不大,但是死区的体积比率减小了 5%。活塞流与死区的相对体积分数比由 0.628 扩大到 0.858,说明浇铸区由死区占主导地位变为活塞流与死区所占体积分数基本相当。2[#]和 3[#]水口平均停留时间 T_a 、响应时间 T_r 、峰值时间 T_p 等均有所提高,而且各水口之间钢水的最大 ΔT_a 也有所减小。而且各组数据的离散程度都有明显减小,出水口响应时间对应的标准差 S_r 减小了 40% 左右,峰值时间标准差由 38.8 s 降低到 27.1 s,这说明导流管结构对于改善短路流,均匀各流间的温度和流动特性都有很大的作用。

3 中间包数值模拟

采用数值模拟对中间包流场进行数学模拟,描述钢水在中间包内的流动方程有连续方程、动量方程、能量传输方程以及 κ - ε 双方程模型。方程的具体形式、钢水的物性参数及边界

条件根据参考文献[3,4]确定,结合该中间包实际,对其中一些特定的边界条件及参数进行了调整。使数值计算结果和水模型结果对照验证,证明了水力学模型的可靠性,从而得到了比较详实的中间包内钢水的冶金状态分布。

3.1 数值计算结果及分析

图 2 为 4 种方案中间包钢水流线图。从图 2 中可直观地揭示钢水在中间包内的流动轨迹和对夹杂物取出效果的影响。比较可以看出挡墙形式的中间包流线较短,相对停留时间也较短,流经区域也比较小。这对夹杂物上浮去除是不利的,另外说明死区

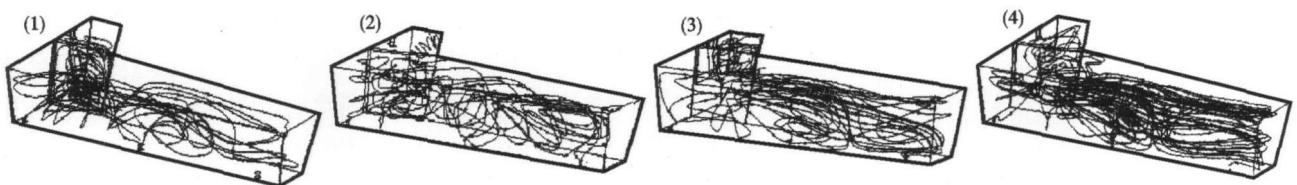


图 2 不同结构中间包的流线图:(1)方案 1;(2)方案 2;(3)方案 3;(4)方案 4

Fig. 2 Schematic pattern of streamline in tundish with different structure: (1) scheme 1; (2) scheme 2; (3) scheme 3; (4) scheme 4

也很大。而假设导流管流线明显增长,流经区域和回流也有所增加,大部分都能够达到液面附近,而且到水口流线长度差距也减小,流动分布更趋于一致。

比较图 2 中的(3)和(4),可以发现两者的流程差别也较大,4 号方案流动状态更佳,不但流程有所增加,钢水回流得到明显增强,中间包内各流的停留时间趋于一致,其结果与水模型实验相符。

4 结论

(1) 中间包内导流墙形式下,3 个水口处实际钢水的最大平均停留时间差达 92 s,水口 1[#]和 2[#]响应时间短存在短路流,死区体积达到 26%,这说明流动特征相差很大,不利于生产过程的稳定和顺行。

(2) 加入导流管后各个水口对应的标准差均有所减小,2[#]和 3[#]水口平均停留时间 T_a 、响应时间 T_r 、峰值时间 T_p 均有所提高,而且各水口之间钢水的最大 ΔT_a 也有所减小。这说明导流管形式对改善中间

包短路流、均匀各流间的温度差,促进夹杂物的上浮都有更加好的效果,而且弧形挡墙加导流管的形式效果更好。

参考文献

- 樊俊飞,张清朗,朱苗勇,等.六流 T 形连铸中间包内控流装置优化的水模研究.钢铁,1998,33(5):24
- 徐南平.钢铁冶金实验技术和研究方法.北京:冶金工业出版社,1999
- 潘咏忠.重钢 3[#]机大方坯连铸中间包流场研究与应用[学位论文].重庆:重庆大学,2005
- 詹树华,吴夜明,徐李军,等.连铸中间包内钢液流动、传热及夹杂物行为的研究.连铸,2007(2):4

崔 阳(1981-),女,硕士研究生,2004 年内蒙古大学毕业,冶金传输研究。

收稿日期:2009-01-20