

八流连铸中间包控流装置优化的水力学模拟

王宏斌 唐海燕 李京社 白李国
(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 通过几何相似比1:3.5的水模型实验对40 t八流中间包不同控流装置下的流场进行了模拟研究。结果表明,原中间包平均滞止时间短,一侧4个水口的停留时间相差较大;优化的双导流孔挡墙可使中间包死区体积分数比原型减少19.15%,优化的C12W1矩形挡墙可使中间包死区体积分数比原型减少31.49%;中间包一侧4个水口的滞止时间差值减少;设置湍流抑制器虽然增加钢液的滞止时间和峰值时间,但不能有效地降低死区体积分数。

关键词 八流中间包 水模型 挡墙 湍流控制器 优化设计

Hydraulic Simulation of Optimization of Flow Control Devices for a Tundish of Eight-Strand Continuous Casting

Wang Hongbin, Tang Haiyan, Li Jingshe and Bai Ligu
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The flow field of in a 40 t tundish with different flow control devices for eight-strand continuous casting has been simulated by test of water model with 1:3.5 geometric similarity scale. Results show that the average stagnation time of original tundish is short and the difference of residence time between four outlets at one side of tundish is large; as compared original tundish the dead area volume fraction of tundish with optimum weir and double diversion holes and with optimum C12W1 rectangle weir respectively decreases by 19.15% and 31.49%, and the difference value of stagnation time between four outlets at one side also decreases; the installed turbulence modifier can increase stagnation time and peak time of molten steel, but not effectively reduce the dead area volume fraction.

Material Index Tundish of Eight-Strand Casting, Water Model, Weir, Turbulence Control Device, Optimum Design

随着中间包冶金技术的发展与完善,中间包不仅是把钢水均匀分配给各个结晶器和实现多炉连铸的中间容器,而且承担着去除夹杂物、合金微调、控制过热等冶金功能^[1]。中间包内合理控流元件的设置以及合理的钢水流动状态对延长钢水在中间包内的停留时间、均匀钢水温度和成分、减少卷渣和促进夹杂物上浮有重要作用。

国内使用八流中间包的钢厂很少,大多用的是三流、四流、六流中间包,即使有也是将2个四流中

间包并在一起^[2,3]。

本研究所用中间包有所不同,其浇铸区为梯形,导流隔墙呈V型,每面墙上有3个孔,其结构示意图如图1所示。中间包由于总长度达8 830 mm,因而若控流装置设计不合理很难使流场均匀,而流场的不均匀、不合理又会导致夹杂物上浮不充分或局部聚集。前期关于钢厂82B钢洁净度的研究表明,大型夹杂物含量偏高^[4],而中间包是去除大型夹杂物的重要容器。因此,本文采用水模型实验研究

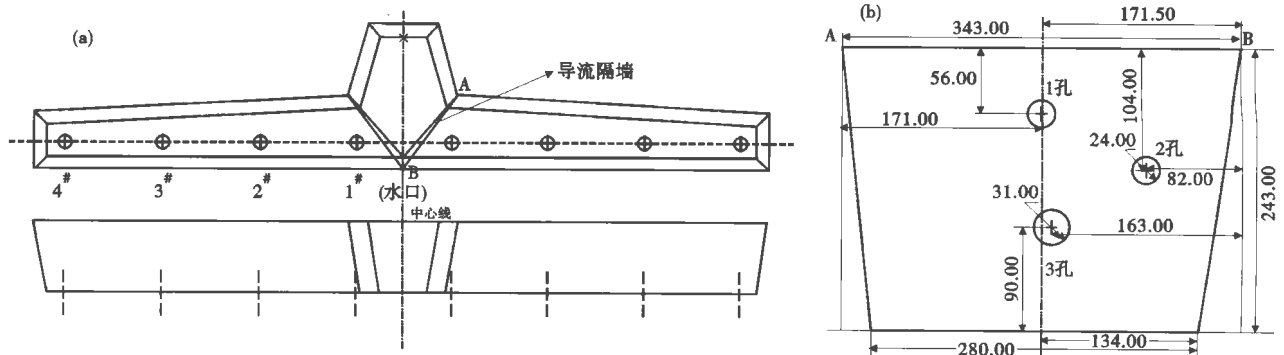


图1 原型中间包(a)和导流隔墙(b)示意图
Fig. 1 Schematics of original tundish (a) and diversion wall (b)

了钢厂中间包内钢水的流动特性,并在此基础上优化了中间包的内部结构。

1 水模型实验原理及方法

水模拟实验的理论依据是相似原理。中间包内钢液的流动一般可视为粘性不可压缩稳态流动,因此系统只要满足几何相似和动力相似就可以满足模型和原型的相似^[5,6]。文献研究表明,中间包内钢液流动与模型中水的流动处于同一自模化区^[7],所以只要保证模型和原型的 Fr 准数相等,就可以保证模型(Fr_m)和原型(Fr_p)的相似,即:

$$Fr = \frac{u_m^2}{gL_m} = \frac{u_p^2}{gL_p} \quad (1)$$

由此计算出模型所对应于原型的体积流量和水口流速,即:

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p \quad (2)$$

$$u_m = \lambda^{0.5} u_p \quad (3)$$

本实验选取实际连铸生产过程中40 t八流中间包为原型,结构示意图如图1(b)所示。浇铸的铸坯断面尺寸是150 mm × 150 mm。选取模型与原型的几何相似比为 $\lambda = 1/3.5$ 。模型与原型对应的工艺参数如表1所示。

表1 原型和水模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of original tundish and water model

项目	原型	模型
中间包高度/mm	950	271
中间包工作液面高度/mm	850	243
长水口插入深度/mm	200	57
中间包顶面长度/mm	9 150	2 614
中间包底面长度/mm	8 830	2 523
拉速/(m · min ⁻¹)	1.3 ~ 1.9	-
2流间距/mm	1 200	343

实验采用“刺激-响应”方法^[8],原型8机8流的两边是对称的,尽管两边结构相同,但流场相互影响,所以本实验在8个下水口处都放置了流量计以控制流量,在其一侧的4个水口位置安装了电导率仪以测定电导率。

当中间包液面保持在适当高度、流场稳定后,在长水口处脉冲加入一定量的饱和KCl溶液作为示踪剂,同时在中间包一侧1#、2#、3#、4#4个出水口处利用电导率仪、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即RTD曲线。从RTD曲线可以直接得到从加入示踪剂到示踪剂流至中间包水口

时的最小停留时间(t_{\min}),又称响应时间或滞止时间和示踪剂浓度达到最大时的峰值时间(t_{\max})。通过对停留时间分布曲线积分,还可得到各流体微元在中间包的实际平均停留时间(t_{av})。

$$t_{\text{av}} = \frac{\int_0^{\infty} tc(t) dt}{\int_0^{\infty} c(t) dt} = \frac{\sum_i t_i c(t_i) \Delta t_i}{\sum_i c(t_i) \Delta t_i} \quad (4)$$

理论平均停留时间: $t_s = V_R/Q$

以理论平均停留时间 t_s 作为基准时间,除停留时间 t ,可得出无因次停留时间 θ ,无因次最小停留时间 θ_{\min} 和平均停留时间 θ_{av} :

$$\theta = \frac{t}{t_s} \quad (5)$$

$$\theta_{\min} = \frac{t_{\min}}{t_s} \quad (6)$$

$$\theta_{\text{av}} = \frac{t_{\text{av}}}{t_s} \quad (7)$$

按照混合模型理论,死区、活塞区和全混区占中间包流体体积的分数(V_d, V_p, V_m)分别为:

$$V_d = 1 - \theta_{\text{av}} \quad (8)$$

$$V_p = \theta_{\min} \quad (9)$$

$$V_m = 1 - V_p - V_d \quad (10)$$

2 实验方案

原型中间包无湍流抑制器,本实验中设计了3种湍流抑制器,如图2(a)所示。并设计了双导流孔的挡墙和矩形挡墙,分别如图2(b)(c)所示。实验了它们在不同组合方式下的流场,实验方案见表2。矩形挡墙是对称的,取其中右面的一半进行方案描述,其侧面的两个孔分别命名为C1、C2,前面的6个孔分别命名为N1、N2、Z1、Z2、W1、W2,方案C12表示只开C1和C2两个孔,C12W1表示开C1、C2、W1 3个孔,余类推。

3 结果分析及讨论

实验结果如表3所示。方案I、II均放置了湍流抑制器,虽然延长了响应时间和峰值时间,但中间包的死区体积分数比原型均有所增大,即放置湍流抑制器不能达到降低死区分数目的。主要是由于中间包缓冲区体积较小,添加湍流抑制器后使得缓冲区体积更小。方案III和原型的响应时间和峰值时间相近,但死区分数比原型增加了0.088。墨汁作为示踪剂显示的流场表明,尽管放置湍流抑制器会

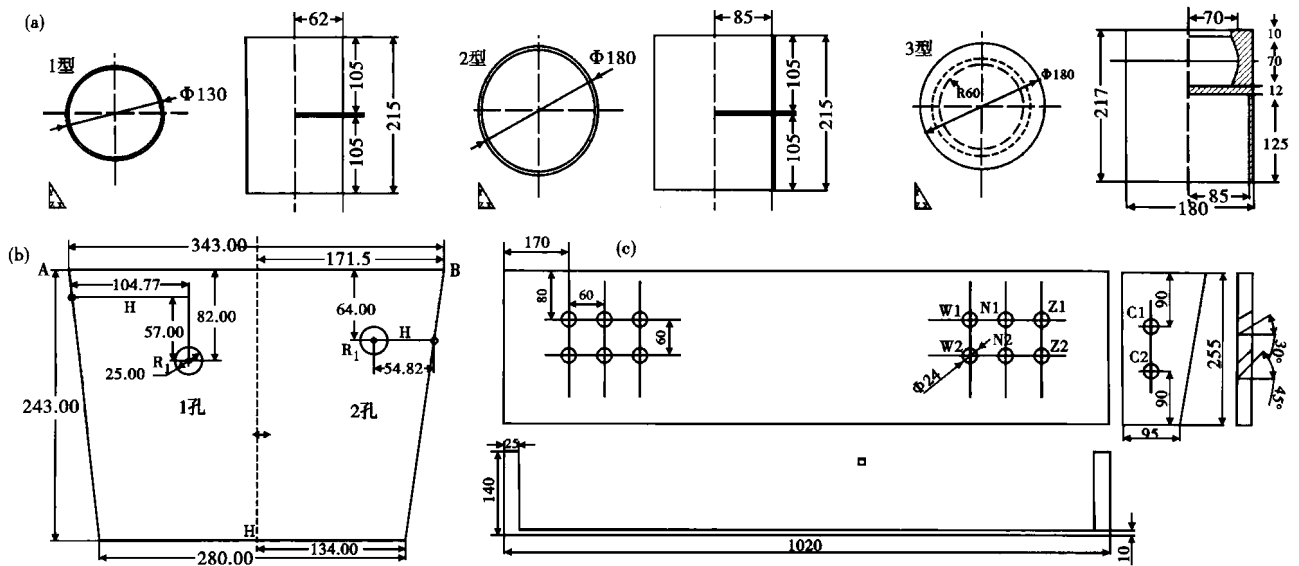


图 2 3 种湍流抑制器(a), 双导流孔导流隔墙(b)和矩形导流隔墙(c)示意图

Fig. 2 Schematics of three kinds of turbulence modifier (a), diversion wall with double diversion holes (b) and rectangle diversion wall (c)

表 2 实验方案
Table 2 Experimental schemes

方案	湍流器	孔的数目	V 型挡墙								
			1 孔		2 孔		3 孔				
			直径/mm	角度	直径/mm	角度	直径/mm	角度			
原型	无	3	24	30	0	24	30	0	31	45	0
I	1 型	3	24	30	0	24	30	0	31	45	0
II	2 型	3	24	30	0	24	30	0	31	45	0
III	3 型	3	24	30	0	24	30	0	31	45	0
IV	无	2	22	20	45	22	30	0	-	-	-
V	无	2	22	20	45	22	30	45	-	-	-
VI	无	2	22	20	45	22	20	0	-	-	-

注: 矩形导流隔墙实验方案: C12、C12W1、C12Z1、C12N1、C1W1、C12W1Z1、C12W12。

表 3 各试验方案中间包内液体的流动特性

Table 3 Fluid flow characteristics in tundish with each test scheme

方案	V_d	V_p	V_m	t_{min}/s	t_{peak}/s
原型	0.235	0.135	0.629	24.13	64.63
I	0.279	0.146	0.575	27.67	74.11
II	0.296	0.158	0.546	30.75	82.37
III	0.323	0.111	0.566	24.25	64.96
IV	0.190	0.177	0.632	21.50	94.38
V	0.258	0.166	0.576	24.25	84.00
VI	0.224	0.171	0.604	21.63	82.38
C12	0.214	0.258	0.528	36.75	131.75
C12W1	0.161	0.269	0.570	35.00	140.75
C12Z1	0.229	0.241	0.530	31.00	126.75
C12N1	0.202	0.266	0.532	33.25	141.00
C1W1	0.234	0.233	0.534	25.75	126.50
C12W1Z1	0.235	0.230	0.534	35.00	115.50
C12W12	0.174	0.284	0.541	33.25	152.75

注: 表中 V_d - 死区体积分数; V_p - 活塞流体积分数; V_m - 全混流体积分数; t_{min} - 响应时间; t_{peak} - 峰值时间。

增加死区分数, 但有利于活跃流场, 增强各流流动的一致性。

在双导流孔挡墙方案 IV ~ VI 中, 方案 IV 的死区体积分数最小, 为 0.190, 方案 VI 的死区分数为 0.224, 都小于原型的 0.235, 但方案 VI 的效果没有 IV 明显; 方案 IV 4 个水口的滞止时间和峰值时间分布比较均匀, RTD 曲线也较平滑。因此, 在双导流孔挡墙方案中, 方案 IV 能有效地减小死区分数, 优化流场。

矩形导流隔墙是在原型和双导流孔挡墙方案基础上的进一步优化:

(1) 原型挡墙的导流孔位于 1# 水口内侧, 实验中发现液体从导流孔流出后 1#、2#、3#、4# 水口依次响应, 响应时间、平均停留时间依次增加, 1# 水口会在短时间内响应, 而 4# 水口则经过较长的时间才得到响应, 这就造成了中间包内的流动从中心到两侧很不均匀, 每侧的 4 个下水口的 RTD 曲线分布、响应时间和平均停留时间相差较大。

(2) 矩形挡墙, 由于挡墙沿中间包方向延至 2# 水口处, 液体从挡墙侧面导流孔流出后, 相对原型距 1# 水口的距离增大, 而距 4# 水口的距离缩短, 这样每侧 4 个水口停留时间相对均匀, 从而会减少直接到达中间包出口的短路流, 4 个水口的 RTD 曲线分布、响应时间以及平均停留时间更趋均匀。而挡墙正面的导流孔会减缓侧面导流孔钢液的压强, 降低钢液从侧孔流出的速度, 使得钢液在中间包内的平均停留时间更长, 更利于夹杂物的上浮。

从表3看出,方案C12W1的死区分数最小,为0.161,滞止时间最长,为35 s,峰值时间为140.75 s,RTD曲线平滑,4个水口流场分布较均匀,如图3所示。方案C12、C12N1、C12W12的死区体积也均比原型小,但优化效果没有方案C12W1好。

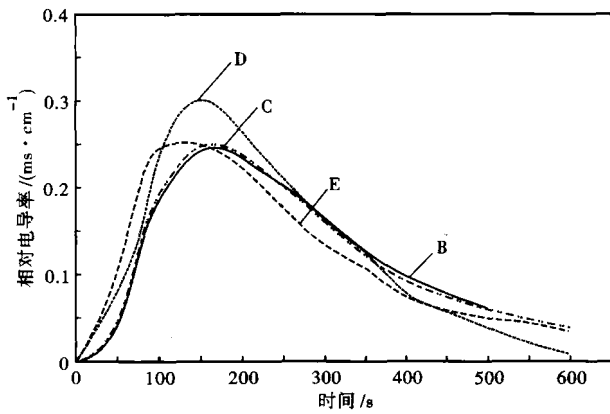


图3 方案C12W1 4个水口的停留时间分布曲线

Fig. 3 Residence time distribution curves of four outlets of scheme C12W1

通过各方案的对比实验发现,方案IV和C12W1对流场的改进效果较好,死区分别比原型减小了19.15%和31.49%,有效地优化了中间包内的流场。

4 结论

(1)中间包原型死区体积分数较大,各个水口的滞止时间相差较大,这会使铸坯的成分和温度不均匀。

(2)针对本研究所用中间包,放置湍流抑制器,不能有效降低中间包的死区体积分数,但可以活跃流场,增强各流流动的一致性。

(3)在双导流孔挡墙的优化实验中,采用方案IV可使中间包的死区体积分数下降到0.190,比原

型减小了19.15%;在矩形挡墙实验中,采用方案C12W1可使中间包的死区体积分数下降到0.161,比原型减小了31.49%。两种优化方案都在不同程度上对原流场进行了改进,使得中间包内部容积得到有效利用,夹杂物有更多的时间上浮;中间包4个水口的滞止时间差值减少,峰值浓度下降,RTD曲线比原型平滑,更加接近于正态分布,中间包内的流场更加均匀、合理。

国家自然科学基金(No. 51074021)、教育部博士点基金(No. 20100006120008)和博士后基金项目(20100480204)资助。

参考文献

- 1 Kumar Anil, Mazumdar Dipak, Koria Satish C. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in a Four-strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal. Iron and Steel Institute of Japan International, 2008, 48(1): 38
- 2 帅 勇,程志洪,周 俐,等. 八流中间包内型优化水模实验. 安徽工业大学学报, 2009, 29(3): 212
- 3 李京社,马 昱,常国平,等. 四流L型中间包控流装置优化的水模拟研究. 钢铁钒钛, 2010, 31(1): 30
- 4 汪庆国,李京社,唐海燕,等. LD-LF-CC 工艺生产 82B 的洁净度研究. 炼钢, 2011, 27(6): 57
- 5 Sahai Yogeshwar, Emi Toshihiko. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. Iron and Steel Institute of Japan International, 1996, 36(6): 667
- 6 阮小江,李京社,王剑斌,等. 兴澄特钢中间包结构优化. 北京科技大学学报, 2007, 29(增刊): 138
- 7 Sahai Y, Burval M D. Validity of Renolds and Froude Similarity Criteria for Water Modeling of Melt Flow in Tundishes. Iron and Steel Society Inc eds. Proceedings of the Electric Furnace Conference. Atlant: Catanzarite K A, 1992: 469
- 8 Tang Haiyan, Li Jingshe, Gao Jinguo, et al. Effect of Flow Control Devices of Tundish on Cleanliness of Billets. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(suppl): 499

王宏斌(1968-),男,博士研究生,钢的质量控制研究。

收稿日期:2012-01-30

邮发代号:38-183

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00元/期 96.00元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社