

· 试验研究 ·

四流中间包气幕挡墙水模拟研究

唐海燕 李京社 于满 包燕平 蒋静
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 采用不同参数的多孔透气砖进行了25 t四流中间包的底部吹气水模拟实验,结合RTD曲线和标准差分析,研究透气砖面积(210~105 mm×56~28 mm)、4种吹气位置和吹气量(60~120 L/h)对中间包液体流动特性的影响,并与不吹气的情况进行了对比。结果表明,中间包吹气能改善液体的流动特性,均衡其不同水口间的停留时间,并能延长峰值时间和降低死区体积。透气砖靠近挡墙,采用小气量和小面积更有利于改善现有中间包流场。

关键词 中间包 吹气 透气砖 水模拟

A Study on Water Modeling of Gas Curtain in a Four-Strand Tundish

Tang Haiyan, Li Jingshe, Yu Man, Bao Yanping and Jiang Jing
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Water modeling test for a 25 t four-strand tundish with bottom blowing gas has been carried out by using porous plug with different performance parameters and combined with RTD curves and standard deviation analysis to study the effect of porous plug area (210~105 mm×56~28 mm), 4 gas blowing location and gas rate (60~120 L/h) on characteristics of fluid flow in tundish and compare with that without bottom blowing gas. Results show that with using bottom blowing gas, the flow characteristics of liquid steel in tundish are improved to balance the residence time of liquid steel at different outlet, prolong the peak concentration time and reduce the dead volume fraction. Gas blowing location near baffle, using smaller gas flow rate and smaller area of porous plug are available to improve the characteristics of fluid flow field of present tundish.

Material Index Tundish, Gas Blowing, Porous Plug, Water modeling

近年来,人们采用水模拟实验及数值模拟的方法对底吹中间包内钢液及夹杂物的运动特性进行了研究^[1-5],认为吹气参数的控制是该技术能否有效发挥作用的关键。实际生产中,气体是通过多孔透气砖吹入中间包的,透气砖的位置和吹气流量对气泡的形成有重要影响。以往的研究中^[6,7],大多是针对一流或二流板坯连铸中间包的。本文以钢厂所用25 t四流中间包加湍流控制器为原型进行研究,其钢包容量为70 t,浇铸280 mm×325 mm铸坯。

1 实验原理和方法

25 t四流方坯中间包的湍流控制器的结构如图1(K)所示,圆弧型挡墙的两侧和前方各有一个导流孔。以此作为本实验的原型和参照物。

水模型考虑弗鲁德准数Fr相等^[8],根据相似原理可以得到水模型与实际中间包相关参数的关系如下:

$$\lambda = L_m/L_p \quad (1)$$

$$\nu_m/\nu_p = \lambda^{0.5} = 0.6324 \quad (2)$$

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p \quad (3)$$

式中: L_m -模型几何尺寸/m; L_p -实物几何尺寸/m; ν_m -模型中流体的速度/($m \cdot s^{-1}$); ν_p -原型中流体

的速度/($m \cdot s^{-1}$); Q_m -模型中水的体积流量/($m^3 \cdot h^{-1}$); Q_p -原型中钢液的体积流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)。

本实验采用几何相似比 $\lambda = 1:2.5$,模型与原型对应的工艺参数如表1所示。

表1 中间包原型和模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of model and original prototype of tundish

项目	液面高度/m	流间距/m	单个出口的体积流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	长水口浸入深度/m
原型	0.90	1.50	3.00	0.15
模型	0.36	0.60	0.30	0.06

实验采用“刺激-响应”方法^[9],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,同时在中间包一侧边部和中部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短停留时间 t_{min} (又称响应时间)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

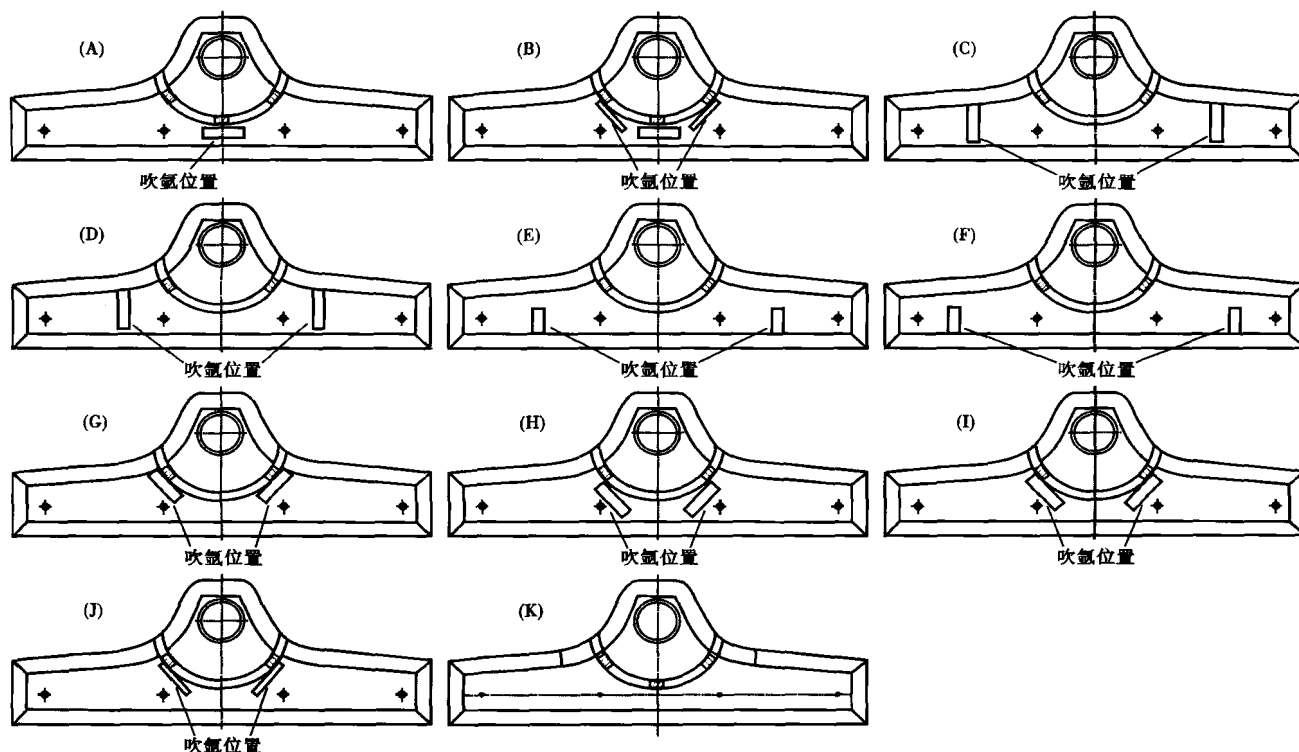


图 1 A~J: 中间包挡墙吹气方案, 气流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$, 透气砖尺寸/mm; A-0.18, 210×56; B-0.12, 210×56; C-0.09, 210×56; D-0.09, 210×56; E-0.09, 105×56; F-0.06, 105×56; G-0.12, 210×56; H-0.12, 105×56; I-0.12, 105×56; J-0.12, 210×28; K: 不吹气压中间包结构

Fig. 1 A~J: scheme of tundish with baffle and blowing gas, gas flow rate $/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$, size of porous plug/mm: A-0.18, 210×56; B-0.12, 210×56; C-0.09, 210×56; D-0.09, 210×56; E-0.09, 105×56; F-0.06, 105×56; G-0.12, 210×56; H-0.12, 105×56; I-0.12, 105×56; J-0.12, 210×28; K: original tundish without gas blowing

到各流体微元在中间包的 actual 平均停留时间 t_{av} 。根据 Ahuja 和 Sahai 提出的修正混合流动模型, 中间包流体流动可划分为分散活塞流体积、死区体积和完全混合流体积, 它们占中间包流体体积分数分别为 V_p 、 V_d 和 V_m 。由于中间包是对称的, 所以只取两流的结果。中间包内流场采用加入墨汁的方法显示, 用摄像机拍摄流体的流动过程。

2 评价指标

当各出水口流出的钢水在中间包内具有相同的流动特征, 即响应时间 t_{min} 、平均停留时间 t_{av} 和钢水温度等相同, 才能保证生产的顺行、铸坯质量的均匀。但这是理想情况, 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其分散程度:

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

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

S 值越大, 所考察参数的离散程度也越大, S 值

越小, 各流的流动特性越接近。

3 实验方案

共进行了 10 个方案的吹气实验, 设定了 4 个不同的吹气位置、4 种不同的气流量和 3 种透气砖尺寸, 透气砖的气孔率为 15% (图 1A~J)。

4 实验结果与分析

4.1 钢水的流动特性分析

从表 2 可见, 除方案 A, 其余方案的死区体积均比原方案小。说明适当吹气可降低中间包内死区比例, 这结果与文献[10]的报道不同。文献[10]的研究表明吹气几乎不影响响应时间, 实验结果不一致可能与中间包的结构有关。

方案 A 和 B 滞止时间都很短, 分别为 42 s 和 36 s。由于前导流孔的存在, 中部水口的滞止时间相对较短, 钢液流动不均衡, 因此以后的实验去掉了前方导流孔。

方案 C 和方案 D 的吹气流量相同而位置不同, 从结果可以看出 D 的死区体积比 C 的小, 为 8.3%,

表2 水模拟实验中流场的流动特性

Table 2 Characteristics of fluid flow field in water model test

方案	响应时间 t_{\min}/s	峰值时间 t_{\max}/s	实际平均停留 时间 t_{av}/s	理论停留 时间 t_s/s	死区体积 分数 $V_d/\%$
A	42	412	658	747	12.0
B	36	377	681	747	8.9
C	38	305	679	747	9.1
D	41	351	685	747	8.3
E	58	360	684	747	8.5
F	59	373	677	747	9.4
G	42	448	713	747	4.8
H	61	446	710	747	5.0
I	54	422	726	747	2.9
J	52	402	709	747	5.2
原型 K	62	275	665	747	11.0

而方案 C 和 E 的吹气位置和流量相同,透气砖面积不同,E 的响应时间远大于 C,死区比例小于 C。方案 E 与 F 的砖面积相同但吹气位置和流量不同,E 的死区比例小于 F。说明吹气位置靠近挡墙、流量和砖面积较小均有利于改善流场的流动特性。

方案 G 滞止时间仅为 42 s,而 H 滞止时间达到了 61 s,从墨汁显示的流场看到(流场图略):方案 G 中,从导流孔流出的流体沿着气幕挡墙先向上运动到液体表面,然后由于出口的抽引力迅速向下流动到达中部水口。方案 H 的透气塞离开导流孔一段距离,所以从导流孔出来的流体一部分沿着气幕挡墙和中间包后壁的缝隙运动,另一部分沿着气幕流向液体表面。由于第一流股弱化了出口的抽引力,因而使响应时间延长。

从响应时间和死区比例综合考虑,实验方案 H、I、J 均是比较满意的结果,响应时间分别为 61、54、52 s,死区比例分别为 5.0%、2.9%、5.2%,比不吹气时分别降低了 54.5%、73.6% 和 52.7%。

4.2 标准差分析

参考文献

- 张美杰,汪厚植,黄 奥,等.透气砖对底吹中间包钢液流动特性影响的水力学模拟.武汉科技大学学报,2006,29(5):433
- 詹树华,欧俭平,萧泽强.底吹气连铸中间包内气液两相流的数值模拟.过程工程学报,2005,5(3):233
- Ramos-Banderas A, Morales R D. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in T-Type Tundish. ISIJ International, 2003, 43(5):653
- 张美杰,汪厚植,黄 奥,等.气幕挡墙中间包钢水流动的数值模拟.特殊钢,2006,27(1):30
- Zhang L F, Taniguchi S, Cai K K. Fluid Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundish. Metall Mater Trans B, 2000, 31B(4):253
- 杨红岗.连铸中间包气幕挡墙水模拟实验研究.中国冶金,2007,17(4):42
- 倪修华,韩乃川,江中块.梅钢 2 号连铸机中间包气幕挡墙的水模

由表 3 可知,从响应时间 t_{\min} 来看,方案 E、H、I、J 均较原方案 K 标准差小,即边部和中部水口的响应时间均相差很小,但方案 E 的平均停留时间 t_{av} 的标准差较大,这样不利于夹杂物的上浮。方案 H、I、J 的响应时间、平均停留时间和标准差均比原方案小,方案 I 的死区比例由原方案的 0.11 降低到 0.029,活塞流与死区的相对体积分数比 $R_{p/d}$ 由 0.755 扩大到 2.469,全混流与死区的相对体积分数比 $R_{m/d}$ 由 7.336 扩大到 31.01,说明此方案更有利于钢液温度和成分的均匀。

表3 标准差分析结果

Table 3 Analyzing results of standard deviation

方案	$S_{t_{\min}}/s$	$S_{t_{av}}/s$	V_p	V_m	V_d	$R_{p/d}$	$R_{m/d}$
A	7.071	26.16	0.056 2	0.823 8	0.120	0.468	6.865
B	5.657	6.36	0.048 2	0.862 8	0.089	0.542	9.694
C	4.950	18.38	0.050 2	0.858 8	0.091	0.552	9.437
D	5.657	31.11	0.054 9	0.862 1	0.083	0.661	10.390
E	1.414	28.99	0.077 6	0.837 4	0.085	0.913	9.852
F	4.596	0.35	0.079 3	0.826 7	0.094	0.844	8.795
G	8.132	30.05	0.056 6	0.895 4	0.048	1.179	18.650
H	1.768	15.56	0.081 3	0.868 7	0.050	1.626	17.370
I	1.414	9.19	0.071 6	0.899 4	0.029	2.469	31.010
J	0.707	10.61	0.068 9	0.879 1	0.052	1.325	16.910
原型 K	2.828	16.97	0.083 0	0.807 0	0.110	0.755	7.336

注: $S_{t_{\min}}$ -钢液在边部和中部水口的响应时间标准差; $S_{t_{av}}$ -钢液在边部和中部水口的平均停留时间标准差; V_p 、 V_m 、 V_d -分别为活塞流、完全混合流、死区体积占中间包流体的体积分数; $R_{p/d}$ -活塞流和死区的体积比; $R_{m/d}$ -全混流和死区的体积比。

5 结论

(1) 中间包吹气可以改善流场特性,减小边部和中部水口的响应时间差,延长峰值时间,减小死区体积,改善夹杂物去除的动力学条件。

(2) 针对本实验所用中间包结构,吹气位置靠近挡墙,透气砖面积小较为有利,方案 I 最佳。

研究.梅山科技,2006(4):35

- 王建军,包燕平,曲 英.中间包冶金学.北京:冶金工业出版社,2001
- 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
- Zhong L, Li L, Wang B, et al. Water Modelling Experiment of Argon Bubbling Curtain in a Slab Continuous Casting. Steel Research International, 2006, 77(2):103

唐海燕(1970-),女,讲师,纯净钢的理论研究与工艺研究。

收稿日期:2010-02-23