

# 多流中间包钢液流动特性分析方法

李东侠<sup>1)</sup>, 崔衡<sup>1,2)</sup>✉

1) 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083 2) 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083  
✉ 通信作者, E-mail: cuiheng@ustb.edu.cn

**摘要** 中间包水模型实验一般采用脉冲刺激-响应实验,分析所得平均停留时间分布(RTD)曲线特征;然而经典组合模型处理多流中间包RTD曲线时经常出现负体积死区分率或结果偏差较大的问题.本文基于组合模型,采用阶段刺激-响应实验,分析所得累计停留时间分布 $F$ 曲线特征,对死区比例和活塞区比例进行计算.该模型计算方法适用于多流中间包的流场特征计算.基于累计停留时间分布曲线特征分析,对某钢厂七流中间包控流装置结构进行优化,优化后的中间包死区比例降低,各流差异减小,有利于生产顺行和铸坯质量的提高.

**关键词** 连铸; 中间包; 钢液流动; 流动特性; 方法论  
**分类号** TF777

## A method for characterizing the flow fluid in a multi-strand tundish

LI Dong-xia<sup>1)</sup>, CUI Heng<sup>1,2)</sup>✉

1) Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2) Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
✉ Corresponding author, E-mail: cuiheng@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** The residence time distribution (RTD) obtained from a pulse tracer experiment is always used for characterizing the flow fluid in tundishes. However, it is not suit to multi-strand or asymmetric tundishes because of negative volume or deviations calculated by the typical combined model using the RTD. In this paper, the accumulated residence time distribution ( $F$  curve) obtained from a step tracer experiment is applied to dead volume and plug volume calculations. This method is appropriate for single-strand tundishes and multi-strand tundishes. In this way, a 7-strand tundish in a steel plant is studied for optimizing its flow control devices. In the end, the dead volume decreases, and the distribution of molten steel among the strands tends to uniform, which benefits the slab quality and production process.

**KEY WORDS** continuous casting; tundishes; molten steel flow; flow characteristics; methodology

分析中间包内钢液的平均停留时间分布曲线(RTD)是中间包物理、数值模拟采用的重要评价方法和手段<sup>[1-3]</sup>.针对不同形式的RTD曲线,国内外专家提出相应的模型和修正方法<sup>[4-6]</sup>,其中应用比较广泛的为Sahai和Emi修正后的经典组合模型.经典组合模型在处理多流中间包时,计算所得死区比例会出现负体积比率,与实际情况偏差较大的问题<sup>[7-8]</sup>.针对多流中间包RTD曲线的分析问题,国内外专家基于经典

修正组合模型提出总体分析法、多流流动一致性判别、多流中间包数值模型等<sup>[9-10]</sup>处理手段.本文采用阶段刺激-响应实验,基于累计停留时间分布 $F$ 曲线,计算相应的死区比例和活塞区比例,并将该方法运用于多流中间包流场特性的分析.

## 1 分析模型与方法

中间包水模型实验研究过程示踪剂在入口处的加

入方式包括脉冲信号、阶段信号、周期信号、随机信号等信号类型,如图 1 所示. 将中间包出口检测到的响应信号转换为无因次浓度-时间曲线图,得到相应的流体停留时间分布曲线<sup>[11-12]</sup>.

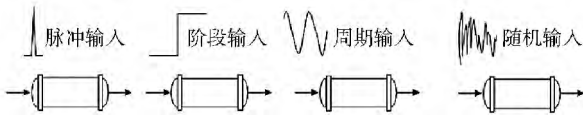
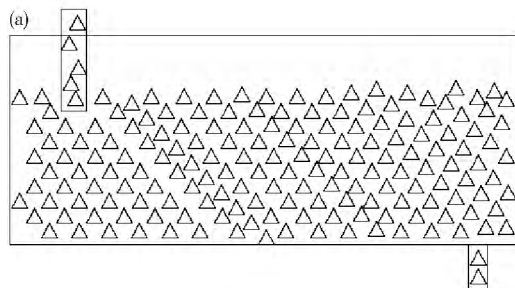


图 1 示踪剂加入方式示意图

Fig. 1 Various ways of studying flow patterns in vessels

修正后的经典组合模型认为: 钢液在中间包内停留时间长于 2 倍理论停留时间, 被视为不活跃部分, 即



死区. 该模型对死区比例的计算采用脉冲信号输入实验分析对应 RTD 曲线. 本文采用阶段信号输入实验, 分析对应累积停留时间分布  $F$  曲线, 计算中间包死区比例与活塞区比例.

图 2(a) 为阶段刺激响应实验在  $t=0$  时刻中间包钢液分布情况, 空心三角形表示  $t=0$  时刻中间包内钢液. 实验开始后将入口流体全部切换为示踪流体, 如图 2(b) 所示, 示踪剂(实心三角形)进入中间包, 经过 2 倍理论停留时间后, 中间包内空心三角形流体的体积分数便为“在中间包内停留时间长于 2 倍理论停留时间的流体体积”.

图 3 为中间包阶段刺激-响应实验得到的典型累

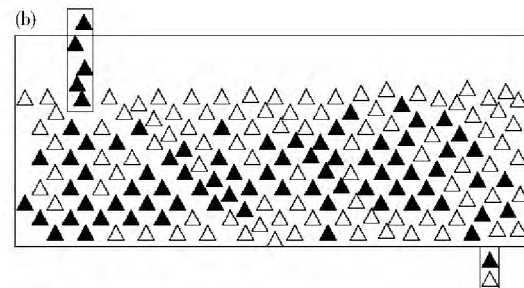


图 2 中间包钢液混合示意图. (a)  $t \leq 0$  时刻钢液分布; (b)  $t > 0$  时刻钢液与示踪剂分布. 图中空心三角形表示  $t=0$  时刻中间包内钢液分布, 实心三角形表示示踪剂分布

Fig. 2 Mixed mode of the melt flow in a tundish: (a) distribution of liquid steel at time  $t \leq 0$ ; (b) distribution of steel liquid and tracers at time  $t > 0$ . Hollow triangles indicate liquid steel distribution at time  $t=0$ , and solid triangles represent the tracer distribution

积停留时间分布  $F$  曲线. 监测所得  $F$  曲线将  $F=1$  以下的区域分为两部分: 上部面积代表流出中间包的空心三角形流体总体积即旧流体体积, 下部面积代表流出中间包实心三角形流体的总体积即新流体体积. 监测所得  $F$  曲线  $\theta > 2$  上部面积为“中间包内停留时间长于 2 倍的理论停留时间的流体体积”. 所以该实验死区比例计算公式为

$$\frac{V_d}{V} = \int_0^\infty (1-F) d\theta = 1 - \int_0^2 (1-F) d\theta. \quad (1)$$

式中  $\frac{V_d}{V}$  为中间包死区比例,  $F$  为阶段刺激响应实验累积停留时间分布函数  $\theta$  为量纲一的时间.

对于活塞区比例的计算, 根据修正后的经典组合模型: 量纲一的滞止时间  $\theta_{min}$  为活塞区比例, 而且这种评判方法已被广泛使用和接受<sup>[4]</sup>. 同理, 对应于本模型的  $F$  函数曲线上, 即可得到活塞区比例计算方法:

$$\frac{V_p}{V} = \theta_{min}. \quad (2)$$

式中  $\frac{V_p}{V}$  为中间包活塞区比例,  $\theta_{min}$  为量纲一的滞止时间.

全混区比例计算公式为

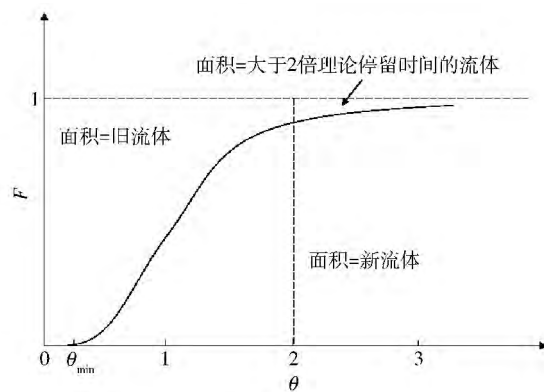


图 3 累计停留时间分布  $F$  曲线

Fig. 3 Typical accumulated residence time distribution  $F$ -curve for the flow fluid in a tundish

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_d}{V} - \frac{V_p}{V}. \quad (3)$$

式中  $\frac{V_m}{V}$  为中间包全混区比例.

多流中间包各流流出的空心三角形流体总和便为整个中间包流出旧流体体积, 根据上述计算公式, 将各流检测所得  $F$  曲线进行累加得到流出中间包旧流体的总体积, 从而计算相应死区比例, 计算方法如下:

$$\frac{V_d}{V} = \int_2^\infty (1 - F_1 - F_2 - \dots - F_k) d\theta = 1 - \int_0^2 (1 - F_1 - F_2 - \dots - F_k) d\theta \quad (4)$$

式中  $F_1, F_2, \dots, F_k$  分别为多流中间包 1~k 流的量纲一的累积停留时间分布曲线函数。

根据经典组合模型,活塞区比例为量纲一的滞止时间  $\theta_{min}$ ,多流中间包活塞区比例为各流平均响应时间<sup>[4,7]</sup>,即

$$\frac{V_p}{V} = \frac{\theta_{min1} + \theta_{min2} + \dots + \theta_{mink}}{k}$$

全混区比例计算公式为

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_d}{V} - \frac{V_p}{V}$$

式中  $\theta_{min1}, \theta_{min2}, \dots, \theta_{mink}$  分别为多流中间包 1~k 流的量纲一的滞止时间  $k$  为中间包出水口数量。

## 2 水模型实验

对于多流中间包而言,不合理的控流装置不仅会导致钢液的流动状态较差,而且会导致各流之间差异较大,直接影响生产的稳定和顺行。本文以某钢厂七流方坯连铸中间包为原型,建立相似比  $\lambda = 1/2$  的有机玻璃模型,结构示意图如图 4 所示,水口从左向右依次为 1~7 号水口。采用水作为模拟钢液的介质,对该中间包的控流装置进行优化,具体实验工艺参数见表 1。

本次优化实验采用阶段刺激-响应实验,即实验开始  $t = 0$  时刻,将入口流体切换为 1% KCl 示踪流体,检测各流累积停留时间分布曲线,根据该七流中间包的对称性,采集其中 1#~4# 水口的浓度变化曲线,实验系统如图 5 所示。

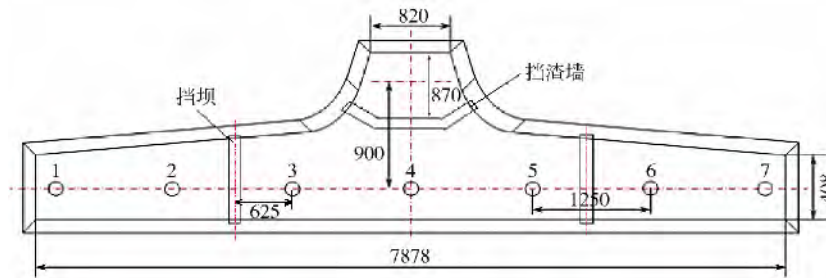


图 4 某钢厂七流中间包示意图(单位: mm)

Fig. 4 7-strand tundish of a steel company (unit: mm)

表 1 原型和模型的主要工艺参数

Table 1 Experimental parameters for the prototype and the model

| 研究对象 | 液面高度/mm | 单流水口流量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) | 水口间距/mm | 长水口浸入深度/mm |
|------|---------|-------------------------------|---------|------------|
| 原型   | 800     | 3.267                         | 1250    | 80         |
| 模型   | 400     | 0.5775                        | 625     | 40         |

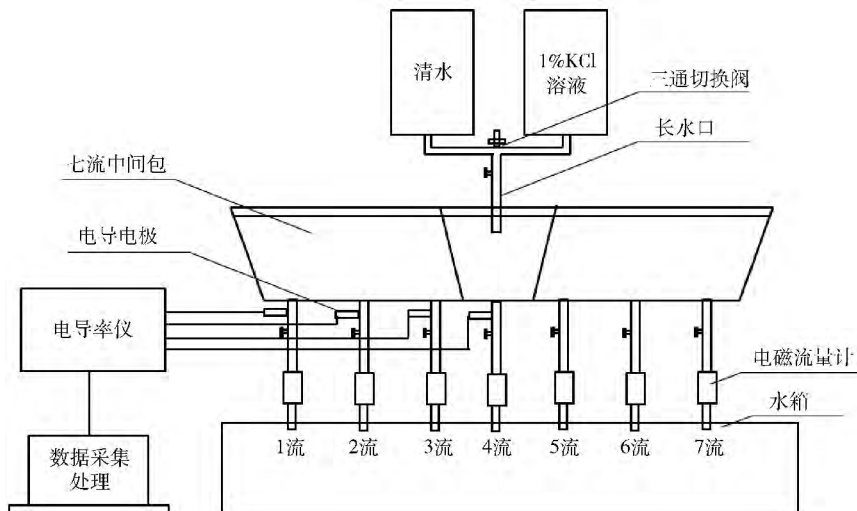


图 5 实验装置示意图(单位: mm)

Fig. 5 Experimental system (unit: mm)

根据原型挡渣墙尺寸和中间包结构,对挡渣墙结构和尺寸进行重新设计. 新设计挡渣墙夹角由原型的

140°减小为 135° 相应调整各边尺寸以适应中间包尺寸,并提升导流孔高度,详细结构尺寸如图 6 所示.

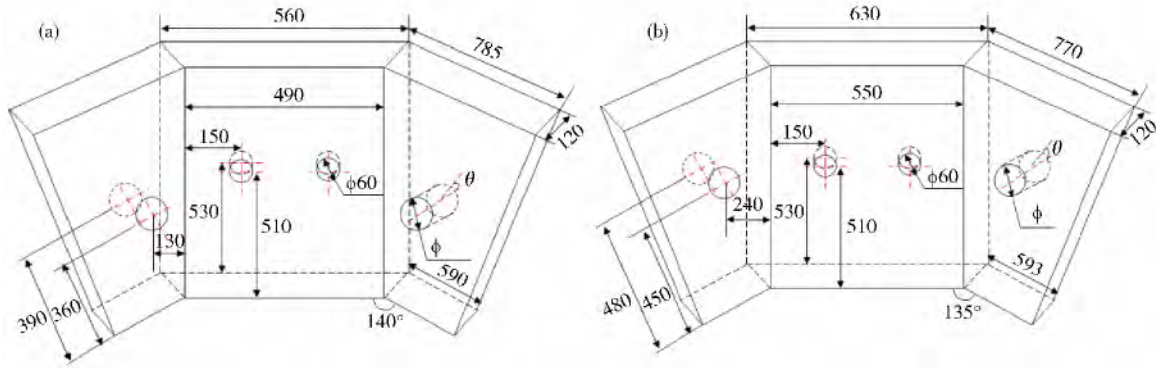


图 6 原型 (a) 与新设计 (b) 挡渣墙结构 (单位: mm)

Fig. 6 Old (a) and new (b) slag dams (unit: mm)

根据原型中间包挡渣墙结构和挡坝高度,对挡渣墙尺寸、导流孔尺寸、导流孔位置和挡坝高度进行优化实验,详细试验方案 and 对应参数如表 2 所示.

表 2 控流装置结构尺寸 (对应现场尺寸)

Table 2 Scales of the flow control devices (corresponding the prototype)

| 实验编号 | 挡渣墙结构 | 导流孔直径/mm | 导流孔导角/(°) | 挡坝高度/mm |
|------|-------|----------|-----------|---------|
| 1    | 原型结构  | 120      | 20        | 175     |
| 2    | 原型结构  | 120      | 20        | 200     |
| 3    | 原型结构  | 120      | 15        | 150     |
| 4    | 原型结构  | 120      | 20        | 150     |
| 5    | 原型结构  | 120      | 25        | 150     |
| 6    | 新型结构  | 100      | 25        | 150     |
| 7    | 新型结构  | 90       | 25        | 150     |
| 8    | 新型结构  | 80       | 25        | 150     |

### 3 实验结果及分析

图 7 为 1# 实验采集得到的各水口累积停留时间分布  $F$  曲线. 从图中可以看出: 新注入的钢液较先到达 3# 与 4# 水口, 该处水口较易形成短路流, 两流监测浓度变化趋势一致, 累积流出的新钢液较多, 中间包容积不能得到有效利用导致死区比例增加; 1# 与 2# 水口浓度变化趋势一致, 该处水口滞止时间较大, 对应活塞区比例较高, 新钢液积分区域较小. 运用式 (4) 计算得到该中间包的死区比例, 由此计算得到活塞区比例和全混区比例:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \int_0^2 (1 - 2F_1 - 2F_2 - 2F_3 - F_4) d\theta \approx 1 - 0.76 = 23.6\% \quad (5)$$

$$\frac{V_p}{V} = \frac{2\theta_{\min 1} + 2\theta_{\min 2} + 2\theta_{\min 3} + \theta_{\min 4}}{7} \approx 8.3\% \quad (6)$$

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_d}{V} - \frac{V_p}{V} = 1 - 23.6\% - 8.3\% = 68.1\% \quad (7)$$

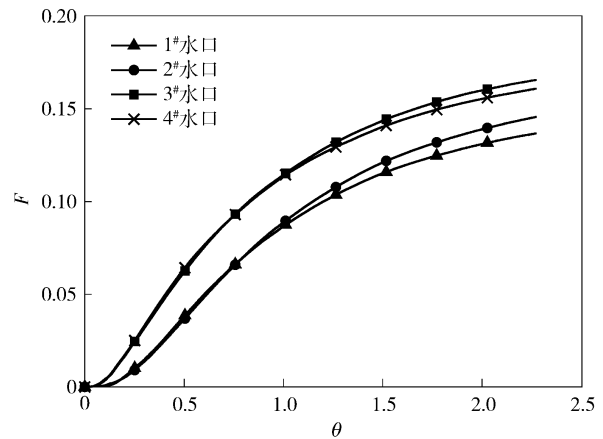


图 7 1# 实验各流 (1~4 流) 累积时间分布  $F$  曲线

Fig. 7 Accumulated residence time distribution (1~4 strands)  $F$ -curve of Experiment 1#

图 8 为 6# 实验采集得到的各水口累积停留时间分布  $F$  曲线. 对比 1# 实验所得结果可以看出: 各流水口监测响应时间和浓度变化趋势较为一致, 新钢液在新的控流装置作用下使各流钢液分配更为均匀; 各流曲线变化较为平缓, 中包有效利用体积增加, 计算所得死区比例、活塞区和全混区比例分别为 6.4%、6.9% 和 86.7%.

同样采用该方法, 得到其他各组实验的死区比例、活塞区比例和全混区比例, 所得结果如表 3 所示. 从表中可以看出 6# 中间包控流装置实验死区比例最小, 全混区比例较大, 从累积时间分布  $F$  曲线分析结果得出该组实验工况各流钢液分布比较均匀, 可有效减小现场生产各流之间的差异, 有利于生产顺产和铸坯质量的提高.

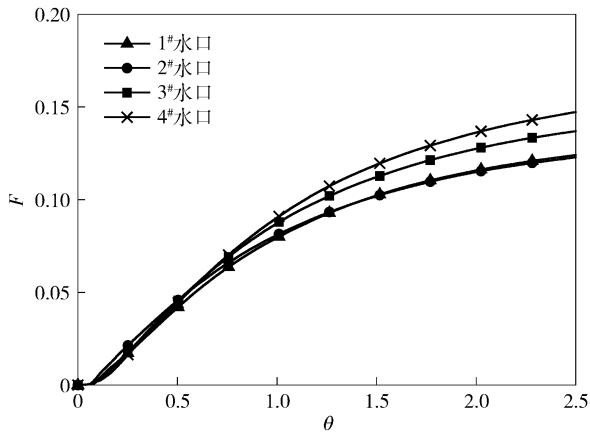


图 8 6#实验各流(1~4流)累积时间分布 F 曲线

Fig. 8 Accumulated residence time distribution (1-4 strands) F-curve of Experiment 6#

表 3 实验计算结果汇总

Table 3 Results of the experiments

| 实验编号 | 死区比例 /% | 活塞区比例 /% | 全混区比例 /% |
|------|---------|----------|----------|
| 1    | 23.6    | 8.3      | 68.1     |
| 2    | 25.6    | 10.2     | 64.2     |
| 3    | 25.7    | 8.6      | 65.7     |
| 4    | 29.5    | 8.2      | 62.3     |
| 5    | 33.1    | 11.8     | 55.1     |
| 6    | 6.4     | 6.9      | 86.7     |
| 7    | 16.6    | 6.5      | 76.9     |
| 8    | 23.3    | 6.2      | 70.5     |

图 9 为 1#实验在  $t = 5, 50$  和  $100$  s 时刻的流场显示. 从图中可以看出: 新钢液注入中间包, 在冲击区混合较为剧烈, 在  $\phi 120$  mm 导流孔的作用下钢液流向 5# 水口塞棒;  $t = 50$  s 时 4# ~ 5# 水口已检测到新钢液流出. 该工况各流滞止时

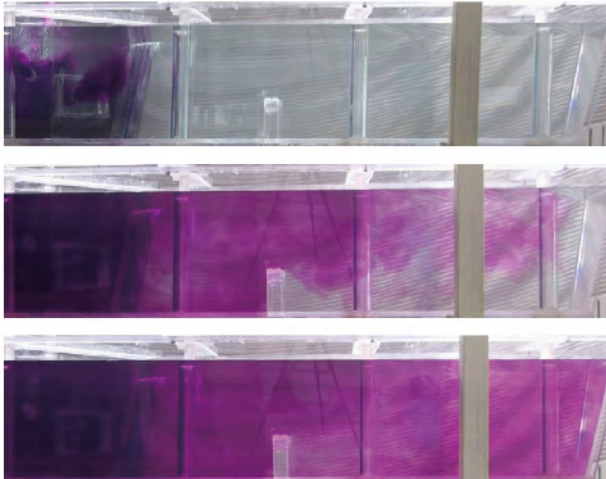


图 9 1#实验流场显示

Fig. 9 Records of the dye experiment from Experiment 1#

间差异较大, 4# ~ 5# 水口易形成短路流, 无法有效利用中间包容积, 造成死区比例升高, 不利于夹杂物上浮.

图 10 为 6#实验在  $t = 5, 50$  和  $100$  s 时刻的流场显示. 从图中可以看出: 新挡墙夹角变小, 导流孔位置升高, 新钢液在  $\phi 100$  mm 导流孔作用下冲向 5# 和 6# 水口塞棒之间, 冲击速度和高度增加, 有利于整个中间包尤其是 6# ~ 7# 水口浇铸区域钢液的活跃程度; 在  $t = 50$  s 时, 各流水口均检测到新钢液的流出, 各流滞止时间较为一致, 整个中间包流场较为活跃, 中间包容积得到有效利用, 全混区比例增加, 死区比例减少, 有利于钢液在中包内的混匀, 促进夹杂物上浮与去除, 从而提高连铸坯质量.

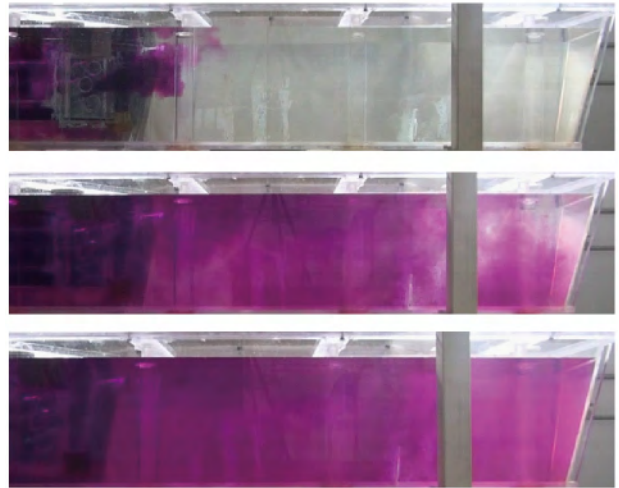


图 10 6#实验流场显示

Fig. 10 Records of the dye experiment from Experiment 6#

## 4 结论

(1) 基于组合模型采用阶段刺激-响应实验, 分析所得累积时间分布 F 曲线, 推导出中间包死区比例计算方法为  $\frac{V_d}{V} = 1 - \int_0^2 (1 - F) d\theta$ . 该处理方法适用于多流中间包流场特征分析, 相应死区比例为各流 F 曲线累积所得  $\frac{V_d}{V} = 1 - \int_0^2 (1 - F_1 - F_2 - \dots - F_k) d\theta$ . 同时根据经典组合模型和多流中间包特征计算活塞区比例  $\frac{V_p}{V} = \frac{\theta_{\min 1} + \theta_{\min 2} + \dots + \theta_{\min k}}{k}$ . 该计算方法为解决经典组合模型处理多流中间包存在的偏差提供了新的方法和思路.

(2) 基于阶段刺激-响应实验, 对某钢厂七流对称中间包的控流装置进行优化实验. 最优控流装置中间包死区比例降低 17.2%, 各流响应时间较为一致, 中间包有效利用容积提升, 有利于促进夹杂物上浮和现场生产顺利进行, 提升铸坯质量.

## 参 考 文 献

- [1] Li Y H, Zhao L H, Bao Y P, et al. Flow characteristic of molten steel in slab casting tundishes. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(1): 21  
(李怡宏, 赵立华, 包燕平, 等. 板坯中间包内钢液流动特性. 北京科技大学学报, 2014, 36(1): 21)
- [2] Wen G H, Huang Y F, Tang P, et al. Improvement of tundish shape and optimization of flow control devices for sequence casting heavy steel ingots. *Int J Miner Metall Mater*, 2012, 19(1): 15
- [3] Kumar A, Mazumdar D, Korla S C. Modeling of fluid flow and residence time distribution in a four-strand tundish for enhancing inclusion removal. *ISIJ Int*, 2008, 48(1): 38
- [4] Sahai Y, Emi T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. *ISIJ Int*, 1996, 36(6): 667
- [5] Zong J H, Yi K W, Yoon J K. Residence time distribution analysis by the modified combined model for the design of continuous refining vessel. *ISIJ Int*, 1999, 39(2): 139
- [6] Chiang L K. Water modelling of IPSCO's slab caster tundish // *Steelmaking Conference Proceedings*. Toronto, 1992: 437
- [7] Zheng S G, Zhu M Y. Analysis model for flow characteristics in multi-strand continuous casting tundish. *Acta Metall Sin*, 2005, 41(10): 1073  
(郑淑国, 朱苗勇. 多流连铸中间包内钢液流动特性的分析模型. 金属学报, 2005, 41(10): 1073)
- [8] Wang J J, Peng S H, Xiao Z Q. Full flow model for analysis on flow pattern in multi-strand tundish. *Steelmaking*, 1998(5): 27  
(王建军, 彭世恒, 肖泽强. 多流中间包流动特征分析的全流量模型. 炼钢, 1998(5): 27)
- [9] Lei H, Zhao Y, Bao J L, et al. Whole analysis approach for residue time distribution curve in multi-strand continuous casting tundish. *Acta Metall Sin*, 2010, 46(9): 1109  
(雷洪, 赵岩, 鲍家琳, 等. 多流连铸中间包停留时间分布曲线总体分析法. 金属学报, 2010, 46(9): 1109)
- [10] Pan H W, Cheng S S. Mathematical model of flow characterization in multi-strand continuous casting tundishes. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(7): 815  
(潘宏伟, 程树森. 多流中间包流动特征的数学模型. 北京科技大学学报, 2009, 31(7): 815)
- [11] Levenspiel O. *Chemical Reaction Engineering*. New York: John Wiley & Sons Press, 2001
- [12] Sahai Y. *Tundish Technology for Clean Steel Production*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009  
(沙哈依. 洁净钢生产的中间包技术. 北京: 冶金工业出版社, 2009)