

# 多流连铸中间包内钢液流动特性的分析模型\*

郑淑国 朱苗勇

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

**摘要** 分析中间包内钢液的停留时间分布 (RTD) 曲线, 从而定量描述其内流动特性的组合模型已被应用数十年, 但对于多流中间包, 目前还没有公认的流动特性分析模型. 本文提出了针对多流中间包流动特性的分析模型, 为多流中间包内的活塞区、混合区、死区体积分数的定量计算提供理论依据, 并与已有的分析方法进行了比较.

**关键词** 连铸, 多流中间包, 流动特性, 分析模型

中图法分类号 TF777

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2005)10-1073-04

## ANALYSIS MODEL FOR FLOW CHARACTERISTICS IN MULTI-STRAND CONTINUOUS CASTING TUNDISH

ZHENG Shuguo, ZHU Miaoyong

School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: ZHU Miaoyong, professor, Tel: (024)83686995, E-mail: myzhu@mail.neu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China and Baoshan Iron and Steel Co.

(No.50274022)

Manuscript received 2005-03-07, in revised form 2005-06-08

**ABSTRACT** A combined model to characterize the melt flow by analyzing the residence time distribution in a tundish had been applied for several decades. However, no well-known model to characterize the melt flow was presented for multi-strand tundish at present. In this paper, a model to characterize the melt flow for multi-strand tundish was presented to calculate the fractions of plug flow, mixed flow and dead volumes, and the model was compared with those of the presented approaches.

**KEY WORDS** continuous casting, multi-strand tundish, flow characterization, analysis model

中间包内腔的设计对提高钢的纯净度十分重要, 水模型实验则是进行中间包内腔和控流装置优化设计的重要手段. 通过一定量的示踪剂注入钢包长水口, 然后在中间包出口处检测得到停留时间分布 (RTD) 曲线, 从而可以分析活塞区、混合区和死区的比例. 利用 RTD 曲线来分析中间包内的流动特性已成为国内外众多研究者优化中间包流场及控流装置的重要手段<sup>[1-5]</sup>.

分析 RTD 曲线应用最广泛的是组合模型<sup>[1,6]</sup>, 但存在一定的误差. Sahai 和 Emi<sup>[7]</sup> 对已经应用数十年的单流中间包组合模型进行了重新修正. 此后, 国内外的许多研究者<sup>[8-11]</sup> 在研究中间包时, 纷纷引用该修正模型. 但此模型的提出是针对单流中间包流动特性. 而特钢企业和中小型企业大都采用多流中间包进行方、圆坯连铸, 目前还没有一个用于分析多流中间包流动特性的模型. 许多研

究者在研究多流中间包过程中, 对 RTD 曲线的分析主要是对各流直接用单流中间包的组合模型<sup>[12,13]</sup>, 或是对用单流中间包组合模型得到的结果取平均<sup>[4,14,15]</sup>, 这些都不是很合理. 不合理的分析模型会对多流中间包流动特性作出错误的判断, 从而影响最终的优化结果, 甚至影响实际生产的效果. 为此, 本文在单流中间包 RTD 曲线组合模型的基础上, 提出一个适合多流中间包的组合模型, 提出了多流中间包的活塞区、混合区、死区的体积分数的计算方法.

### 1 中间包流动特性分析模型

#### 1.1 单流中间包流动特性分析模型

单流中间包最常用的组合模型是将其内流动分为活塞区、混合区 (全混区) 和死区 (滞留区) 三个区<sup>[1,6]</sup>. 活塞区和混合区可称为活跃区. 死区体积是中间包内停留时间大于 2 倍的平均停留时间的流体的体积. 图 1 为该模型的理论 RTD 曲线. 图中,  $C_{\max}$  为无因次峰值浓度;  $\theta_{\min}$  为无因次最小停留时间;  $V$ ,  $V_p$ ,  $V_m$  分别为中间包的总体积、活塞区体积、混合区体积.

\* 国家自然科学基金与上海宝钢集团联合资助项目 50274022

收到初稿日期: 2005-03-07, 收到修改稿日期: 2005-06-08

作者简介: 郑淑国, 男, 1979 年生, 助教, 博士生

Sahai 和 Emi 指出 [7], 对于一个典型的实验所得 RTD 曲线 (图 2), 总体积  $V$  可分为活跃区体积  $V_a$  和死区体积  $V_d$ , 总体积流量  $Q$  可分为活跃区体积流量  $Q_a$  及死区体积流量  $Q_d$ , 即

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \bar{\theta}_c \quad (1)$$

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

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

式中,  $\bar{\theta}_c$  为无因次平均停留时间, 是实际平均停留时间  $\bar{t}_c$  与理论平均停留时间  $\bar{t}$  之比,  $\bar{t}$  为中间包内钢液的体积与体积流量之比,  $\bar{t}_c$  为实验所测得的到  $2\bar{t}$  点时的结果.  $V_d$  为中间包的死区体积.  $\frac{Q_a}{Q}$  等于无因次 RTD 曲线上  $\theta$  从 0 到 2 的面积 (图 2).

### 1.2 多流中间包流动特性分析模型

多流中间包的组合模型可看作是多个单流中间包组合模型的并联, 其活塞区、混合区、死区的体积分别为各

个流的活塞区、混合区、死区的体积之和. 假定中间包有  $N$  流, 其体积、活跃区、活塞区、混合区、死区为  $V, V_a, V_p, V_m, V_d$ ,  $1-N$  流对应的体积、活跃区、活塞区、混合区、死区体积分别为  $V_1-V_N, V_{1a}-V_{Na}, V_{1p}-V_{Np}, V_{1m}-V_{Nm}, V_{1d}-V_{Nd}$ , 总体积流量为  $Q$ , 各流的体积流量分别为  $Q_1, Q_2 \dots Q_N$ , 则其组合模型示意图如图 3 所示, 所对应的理论 RTD 曲线如图 4 所示. 图中的  $C_{1\max} \dots C_{N\max}$  为多流中间包各流的无因次峰值浓度,  $\theta_{1\min} \dots \theta_{N\min}$  为多流中间包各流的无因次最小停留时间.

将  $1 \dots N$  流的体积流量  $Q_1 \dots Q_N$  分别分为活跃区体积流量  $Q_{1a} \dots Q_{Na}$  和死区体积流量  $Q_{1d} \dots Q_{Nd}$ , 图 5 为多流中间包典型的 RTD 曲线示意图. 图中,  $\frac{Q_{1a}}{Q_1} \dots \frac{Q_{Na}}{Q_N}$  为各流的活跃区体积流量  $Q_{ia}$  与该流的总体积流量  $Q_i$  之比 ( $i=1-N$ ), 数值上分别等于各流的无因次 RTD 曲线上  $\theta$  从 0 到 2 的面积 (图 5).

因多流中间包各流的体积流量通常是相等的, 故

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_N = \frac{Q}{N} \quad (4)$$

1 流的无因次最小停留时间

$$\theta_{1\min} = N \cdot \frac{V_{1p}}{V} \quad (5)$$

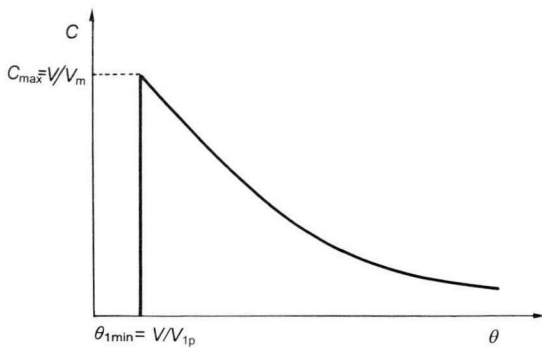


图 1 单流中间包组合模型的理论 RTD 曲线 [7]

Fig.1 Theoretical RTD (residence time distribution) curve of a combined model for single strand tundish [7] ( $C$ -dimensionless concentration,  $\theta$ -dimensionless residence time)

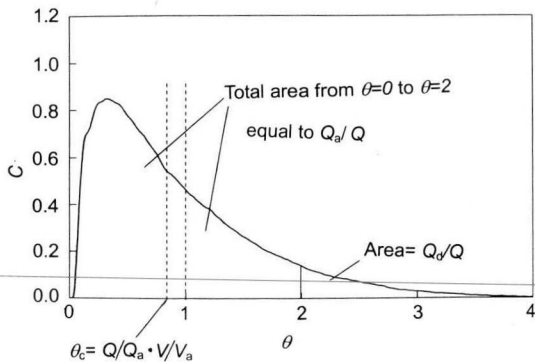


图 2 单流中间包典型的 RTD 曲线 [7]

Fig.2 A typical RTD curve for flow in a single strand tundish [7]

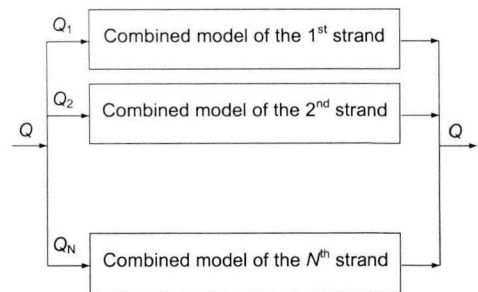


图 3  $N$  流中间包组合模型示意图

Fig.3 Schematics of the combined model for  $N$  strands tundish

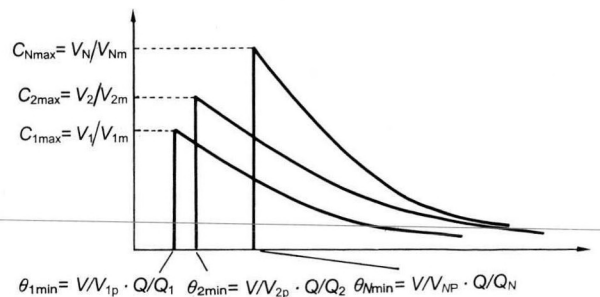


图 4  $N$  流中间包组合模型的理论 RTD 曲线

Fig.4 Theoretical RTD curve of a combined model for  $N$  strands tundish

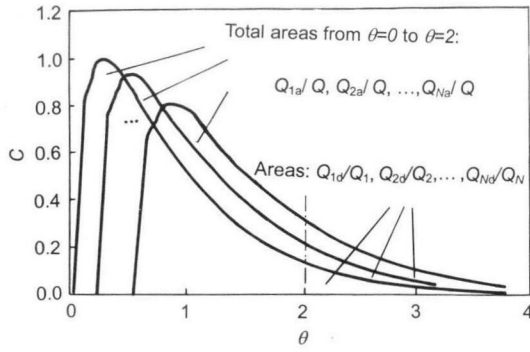


图 5 多流中间包典型的 RTD 曲线示意图

Fig.5 Schematic diagram of typical RTD curves for flow in a multi-strand tundish

即

$$\frac{V_{1p}}{V} = \frac{1}{N} \cdot \theta_{1min} \quad (6)$$

同理

$$\frac{V_{2p}}{V} = \frac{1}{N} \cdot \theta_{2min} \quad (7)$$

...

$$\frac{V_{Np}}{V} = \frac{1}{N} \cdot \theta_{Nmin} \quad (8)$$

中间包总的活塞区体积分数为各流的活塞区体积分数之和，即

$$\frac{V_p}{V} = \frac{V_{1p}}{V} + \frac{V_{2p}}{V} + \dots + \frac{V_{Np}}{V} \quad (9)$$

将式 (6—8) 代入式 (9) 得

$$\frac{V_p}{V} = \frac{1}{N} \cdot (\theta_{1min} + \theta_{2min} + \dots + \theta_{Nmin}) \quad (10)$$

各流的无因次实际平均停留时间

$$\bar{\theta}_{1c} = \frac{\bar{t}_{1c}}{\bar{t}}, \bar{\theta}_{2c} = \frac{\bar{t}_{2c}}{\bar{t}}, \dots, \bar{\theta}_{Nc} = \frac{\bar{t}_{Nc}}{\bar{t}} \quad (11)$$

其中， $\bar{t}_{1c} - \bar{t}_{Nc}$  分别为各流实验所测得的到  $2\bar{t}$  点的实际平均停留时间。且有

$$\bar{\theta}_{1c} = \frac{V_{1a}}{V} \cdot \frac{Q}{Q_{1a}} = N \cdot \frac{V_{1a}}{V} \cdot \frac{Q_1}{Q_{1a}} \quad (12)$$

即

$$\frac{V_{1a}}{V} = \frac{1}{N} \cdot \frac{Q_{1a}}{Q_1} \cdot \bar{\theta}_{1c} \quad (13)$$

同理

$$\frac{V_{2a}}{V} = \frac{1}{N} \cdot \frac{Q_{2a}}{Q_2} \cdot \bar{\theta}_{2c} \quad (14)$$

...

$$\frac{V_{Na}}{V} = \frac{1}{N} \cdot \frac{Q_{Na}}{Q_N} \cdot \bar{\theta}_{Nc} \quad (15)$$

中间包总的活跃区体积分数为各流的活跃区体积分数之和，即

$$\frac{V_a}{V} = \frac{V_{1a}}{V} + \frac{V_{2a}}{V} + \dots + \frac{V_{Na}}{V} \quad (16)$$

将式 (13—15) 代入式 (16) 得

$$\frac{V_a}{V} = \frac{1}{N} \cdot \left( \frac{Q_{1a}}{Q_1} \cdot \bar{\theta}_{1c} + \frac{Q_{2a}}{Q_2} \cdot \bar{\theta}_{2c} + \dots + \frac{Q_{Na}}{Q_N} \cdot \bar{\theta}_{Nc} \right) \quad (17)$$

于是，中间包总的死区体积分数为

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{1}{N} \cdot \left( \frac{Q_{1a}}{Q_1} \cdot \bar{\theta}_{1c} + \frac{Q_{2a}}{Q_2} \cdot \bar{\theta}_{2c} + \dots + \frac{Q_{Na}}{Q_N} \cdot \bar{\theta}_{Nc} \right) \quad (18)$$

这样，多流中间包的活塞区、混合区、死区的体积分数为

$$\frac{V_p}{V} = \frac{1}{N} \cdot (\theta_{1min} + \theta_{2min} + \dots + \theta_{Nmin}) \quad (19)$$

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{1}{N} \cdot \left( \frac{Q_{1a}}{Q_1} \cdot \bar{\theta}_{1c} + \frac{Q_{2a}}{Q_2} \cdot \bar{\theta}_{2c} + \dots + \frac{Q_{Na}}{Q_N} \cdot \bar{\theta}_{Nc} \right) \quad (20)$$

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (21)$$

目前研究者通常采用以下两种方法来计算多流中间包的活塞区、混合区、死区。第一种方法 [12,13] 是将多流中间包的每个流都分别应用单流中间包的组合模型，即

$$\frac{V_{id}}{V} = 1 - \bar{\theta}_{ic}; \quad (i = 1 \dots N) \quad (22)$$

$$\frac{V_{ip}}{V} = \theta_{imin} \text{ 或 } \frac{V_{ip}}{V} = \frac{1}{2}(\theta_{imin} + \theta_{ipeak}); \quad (i = 1 \dots N) \quad (23)$$

$$\frac{V_{im}}{V} = 1 - \frac{V_{ip}}{V} - \frac{V_{id}}{V}; \quad (i = 1 \dots N) \quad (24)$$

其中， $\theta_{ipeak}$  为  $i$  流的无因次峰值浓度时间 ( $i = 1 \dots N$ )。

第二种方法 [4,14,15] 是将第一种方法的各流的相应体积分数分别求平均。这两种方法显然对多流中间包某个单流的无因次最小停留时间  $\theta_{imin}$  和无因次平均停留时间  $\bar{\theta}_{ic}$  理解上有偏差。当中间包为多流时， $\theta_{imin} = N \cdot \frac{V_{ip}}{V}$ ，式 (23) 显然与此不符。此外，多流时， $\bar{\theta}_{ic} = N \cdot \frac{V_{ia}}{V} \cdot \frac{Q_i}{Q_{ia}}$  且由于多流中包某个单流的死区体积分数 ( $\frac{V_{id}}{V}$ ) 与活跃区体积分数 ( $\frac{V_{ia}}{V}$ ) 之和小于 1，因此，多流中间包某个单流的死区体积分数 ( $\frac{V_{id}}{V}$ ) 是不可求的，故式 (22) 事实上是不成立的。

## 2 多流中间包流动特性分析模型应用

本文通过水模实验来优化一个六流中间包的控流装置，示意图见图 6。模型与原型的几何相似比为 1 : 3，选用 Froude 数  $Fr$  作为实验的决定性准数 [6,16]。采用“刺激—响应”实验技术，将一定量的 20% 的 NaCl 溶液快速注入钢包水口中，由电导探头测量中间包三个出口 (因对称，故检测一侧的水口) 处的电导变化的情况，并将输出的电信号通过 A/D 板转换成数字信号后由微机实现数据采集，通过数据处理得到 RTD (停留时间分布) 曲线。中间包典型的 RTD 曲线如图 7 所示。相关实验数据为： $\theta_{1min} - 0.0674$ ,  $\theta_{2min} - 0.0370$ ,  $\theta_{3min} - 0.0474$ ,  $\bar{\theta}_{1c} - 0.8544$ ,

$\bar{\theta}_{2c}=0.7420$ ,  $\bar{\theta}_{3c}=0.7479$ ,  $\frac{Q_{1a}}{Q_1}=0.8980$ ,  $\frac{Q_{2a}}{Q_2}=0.9166$ ,  $\frac{Q_{3a}}{Q_3}=0.9188$ . 用本文提出的多流中间包组合模型对 RTD 曲线进行如下定量分析.

将  $N=3$  代入式 (19—21) 得

$$\frac{V_p}{V} = \frac{1}{3} \cdot (\theta_{1\min} + \theta_{2\min} + \theta_{3\min}) \quad (25)$$

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{Q_{1a}}{Q_1} \cdot \bar{\theta}_{1c} + \frac{Q_{2a}}{Q_2} \cdot \bar{\theta}_{2c} + \frac{Q_{3a}}{Q_3} \cdot \bar{\theta}_{3c} \right) \quad (26)$$

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (27)$$

将上述  $\theta_{i\min}$ ,  $\theta_{ic}$  及  $\theta_{ia}/\theta_i$  的数据代入式 (25—27), 可得

$$\frac{V_p}{V} = 0.0506, \quad \frac{V_d}{V} = 0.2885, \quad \frac{V_m}{V} = 0.6609$$

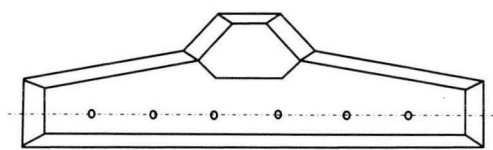


图 6 六流中间包结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of a six-strand tundish

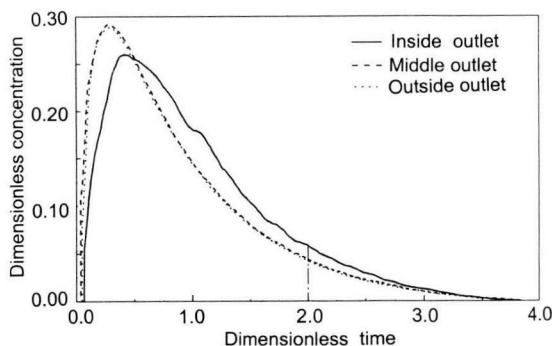


图 7 典型的多孔挡墙控流装置的 RTD 曲线

Fig.7 RTD curves of typical baffle with holes flow control devices

### 3 结论

在单流中间包组合模型的基础上, 建立了多流中间包流动特性的分析模型, 提出了多流中间包内的活塞区、混

合区、死区体积分数的计算方法, 并与已有的分析方法进行了比较, 为多流中间包内控流结构的优化设计提供了理论依据和指导. 利用该模型对一个六流中间包水模实验得到的典型 RTD 曲线的活塞区、混合区、死区体积分数进行了定量计算.

### 参考文献

- [1] Sahai Y, Ahuja R. *Ironmaking Steelmaking*, 1986; 13: 241
- [2] Singh S, Koria S C. *Ironmaking Steelmaking*, 1996; 23: 255
- [3] Mazumdar D, Yamanoglu G, Guthrie R I L. *Steel Res*, 1997; 68: 293
- [4] Zheng S G, Zhu M Y, Jiang G L, Song J P. *Iron Steel*, 2004; 39: 23  
(郑淑国, 朱苗勇, 姜桂连, 宋嘉鹏. 钢铁, 2004; 39: 23)
- [5] Zhong L C, Zhang L. *J Iron Steel Res*, 2002; 14: 6  
(钟良才, 张立. 钢铁研究学报, 2002; 14: 6)
- [6] Sahai Y, Ahuja R. *ISS 69th Steelmaking Conf Proc*, Washington, DC: Iron and Steel Society of AIME, 1986: 677
- [7] Sahai Y, Emi T. *ISIJ Int*, 1996; 36: 667
- [8] Mazumdar D, Guthrie R I L. *ISIJ Int*, 1999; 39: 524
- [9] Palafox-Ramos J, Barreto J D, López-Ramírez S, Morales R D. *Ironmaking Steelmaking*, 2001; 28: 101
- [10] López-Ramírez S, Barreto J D, Vite-Martínez P, Serrano J A R, Duran-Valencia C. *Metall Mater Trans*, 2004; 35B: 957
- [11] Li L Y, Zhong L C, Zhu Y X, Jiang M F, Ren Z P, Meng J S, Zhang F Q, Jiang Z S. *Iron Steel*, 2004; 39(Suppl.): 502  
(李丽颖, 钟良才, 朱英雄, 姜茂发, 任子平, 孟劲松, 张富强, 姜振生. 钢铁, 2004; 39(增刊): 502)
- [12] Zhu M M, Wen G H, Zhang L F, Tang P, Su Z J, Gu W A, Zhao K W, Song G J. *Iron Steel*, 2004; 39(Suppl.): 164  
(祝明妹, 文光华, 张立峰, 唐萍, 苏振江, 顾武安, 赵克文, 宋国菊. 钢铁, 2004; 39(增刊): 164)
- [13] Madias J, Martin D, Ferreyra M, Villoria R, Garamendy A. *ISIJ Int*, 1999; 39: 787
- [14] Xie J, Zheng S G, Wu Y L, Zhu M Y. *J Mater Metall*, 2002; 1: 285  
(谢健, 郑淑国, 吴永来, 朱苗勇. 材料与冶金学报, 2002; 1: 285)
- [15] Fan J F, Zhang Q L, Zhu M Y, Lei H, Wang W Z. *Iron Steel*, 1998; 33: 24  
(樊俊飞, 张晴朗, 朱苗勇, 雷洪, 王文忠. 钢铁, 1998; 33: 24)
- [16] Knoepke J, Mastervich J. *ISS 69th Steelmaking Conf Proc*, Washington, DC: Iron and steel Society of AIME, 1986: 777