

## 中间包结构优化的水模型正交试验

曹雄<sup>1</sup> 张胤<sup>2</sup> 贾攀<sup>3</sup> 韩翠珍<sup>1</sup>

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 内蒙古科技大学稀土学院, 包头 014010;  
3 南京钢铁股份有限公司中厚板卷厂, 南京 210035)

**摘要** 通过1:3水力学模型,按 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行正交试验,研究和优化34 t中间包的结构。结果表明,中间包结构主要主次关系为坝高、堰与长水口间距、坝堰间距、堰深;最佳结构组合为坝高135 mm,堰深90 mm,坝堰间距155 mm,堰与长水口间距为195 mm。与原工况比较,优化方案的综合评分值从74.32提高到91.01。

**关键词** 中间包 水模型 正交试验 综合评分

## Orthogonal Test of Water Model for Optimization of Structure of Tundish

Cao Xiong<sup>1</sup>, Zhang Yin<sup>2</sup>, Jia Pan<sup>3</sup> and Han Cuizhen<sup>1</sup>

(1 Material and metallurgy School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010;  
2 Rare Earth School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010;  
3 Medium and Heavy Plate Mill, Nanjing Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210035)

**Abstract** The structure of a 34t tundish has been studied and optimized by 1:3 water model and orthogonal test with orthogonal table  $L_{16}(4^5)$ . Results showed that the main primary and second sequence of tundish structure was height of weir, distance between dam and long nozzle, distance between weir and dam, and depth of dam; the optimum structure combination was height of weir 135 mm, depth of dam 90 mm, distance between weir and dam 155mm and distance between dam and long nozzle 195 mm. As compared with original tundish structure the comprehensive score of optimized structure increased to 91.01 from original 74.32.

**Material Index** Tundish, Water Model, Orthogonal Test, Comprehensive Score

以钢厂34 t板坯连铸中间包为研究对象,通过建立物理模型,测定示踪剂在中间包内的平均停留时间,综合考虑坝高、堰深、坝堰间距、堰与长水口间距等参数对钢液在中间包内平均停留时间、死区体积比例以及活塞区体积比例的影响,以得到最优参数的组合方案,优化中间包的结构。

### 1 试验原理及方法

#### 1.1 试验原理

动力学相似主要考虑惯性力、粘性力和重力。这些力主要用 $Re$ 和 $Fr$ 准数描述。但相似理论认为,当模型系统中与粘性力有关的雷诺数( $Re$ )进入第二自模化区的临界值( $10^4 \sim 10^5$ )时,系统处于自模化状态,即该系统的流动状态、流速分布与 $Re$ 无关。

本试验模型按与实物1:3比例采用有机玻璃制成,系统处于自模化状态,只要保证与重力有关的弗鲁德准数相等即可。则有:

$$(Fr)_m = (Fr)_r \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \frac{gL_m}{u_m^2} = \frac{gL_r}{u_r^2} \quad (2)$$

$$\text{可以得到} \quad Q_m = \lambda^{5/2} Q_r \quad (3)$$

根据实际的板坯拉速确定试验中对应的水的体积流量。

式中:下标 $m, r$ 分别表示模型和原型; $g$  - 重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$ ;  $L$  - 特征长度/ $m$ ;  $u$  - 流速/ $(m \cdot s^{-1})$ 。原型与模型尺寸见表1。

#### 1.2 试验方法

将清水充满中间包,待其液位稳定后,将饱和NaCl溶液通过钢包迅速注入中间包内。中间包内浓度信号通过安装在其下水口中的电导电极采集,

表1 原型和模型结构参数/mm  
Table 1 Structure parameters of original-tundish and model /mm

参数	液面深度	坝高	堰深	坝堰间距	堰与长水口间距
原型	1 005	255	240	465	825
模型	335	85	80	155	275

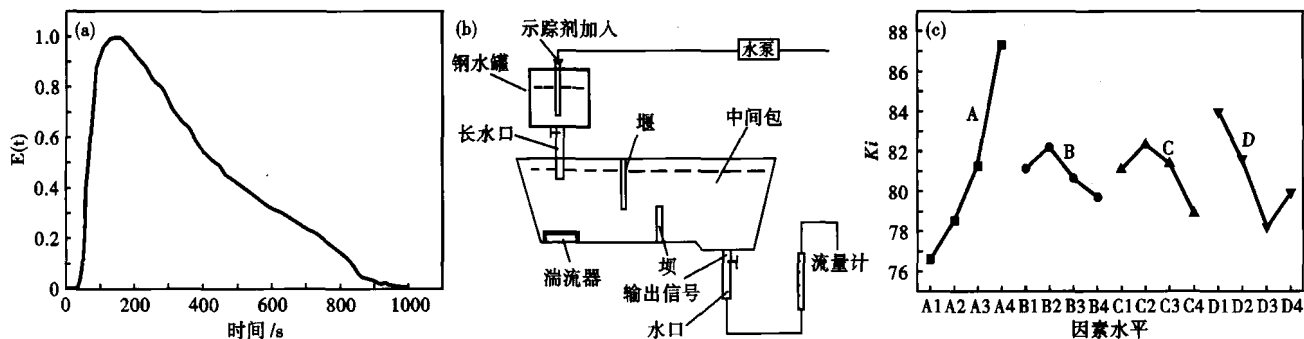


图 1 (a) 流体在中间包模型中典型停留时间分布曲线; (b) 水模型试验装置示意图; (c)  $K_t$  与因素水平关系图

Fig. 1 (a) Typical residence time distribution curve of liquid in tundish model; (b) Schematic diagram of water modeling test device; (c) Schematics of relation between factor-level and  $K_t$

并输入到 DDS-11A 型电导率仪,用多笔记录仪进行浓度信号的采集及浓度曲线的绘制,即为流体在中间包内的停留时间分布(RTD)曲线,典型 RTD 曲线如图 1(a)所示。中间包水模型流程简图如图 1(b)所示。

### 1.3 RTD 曲线的分析

由 RTD 曲线求解钢水在中间包内平均停留时间  $\bar{t}$  的公式如下:

$$\bar{t} = \int tE(t) dt / \int E(t) dt \quad (4)$$

根据 Sahai<sup>[1]</sup> 提出的修正混合流动模型,由 RTD 曲线处理的试验结果计算得到中间包流体的活塞区体积比例,完全混合区体积比例和死区体积比例等流体流动特征参数。其体积比关系如下:

$$V_d = 1 - \theta_{AV} \quad (5)$$

$$V_{dp} = \frac{1}{2} (\theta_{\min} + \theta_{\text{peak}}) \quad (6)$$

$$V_m = 1 - V_d - V_{dp} \quad (7)$$

$$\theta_{AV} = \frac{\bar{t}}{t_m} \quad (8)$$

式中:  $\theta_{AV}$ - 平均浓度无因次时间,即实际平均停留时间与理论平均停留时间之比;  $\theta_{\min}$ - 初始浓度无因次时间,即初始浓度出现时间与理论平均停留时间之比;  $\theta_{\text{peak}}$ - 最大浓度无因次时间,即最大浓度出现时间与理论平均停留时间之比;  $t_m$ - 理论平均停留时间;  $\bar{t}$ - 实际平均停留时间。

## 2 试验方案和结果分析

正交试验按照  $L_{16}(4^5)$  正交实验表来安排<sup>[2]</sup>,根据中间包原型以及预试验结果确定出各因素水平值(表 2)。

平均停留时间与死区体积有关,全混区体积与死区体积、活塞区体积有关。为了简便起见,只考虑

表 2 正交试验因素水平表/mm  
Table 2 Factors and levels table for orthogonal test /mm

水平	A 坝高	B 堰深	C 坝堰间距	D 堰与长水口间距
1	70	80	115	195
2	85	90	155	235
3	110	100	195	275
4	135	110	235	315

死区和活塞区的体积比例,采用综合评分法,即将多个指标化为一个指标来进行直观分析的方法。

根据本试验的具体情况,规定基础分为 70,死区体积比例按 30% 为标准,每增高 1% 就减 1 分,每降低 1% 就加 1 分;活塞区体积比例按 10% 为标准,每增高 1% 就加 1 分,每降低 1% 就减 1 分。根据此规定以及上述提到的 RTD 曲线的处理方法计算得到的原工况试验和正交试验相关数据见表 3。

从表 3 总体结果看,在同样的拉速条件下,改变

表 3 原工况 ( $t_{00}$ ) 和水模型正交 ( $t_{01} \sim t_{16}$ ) 试验数据表  
Table 3 Experiment data of original-condition ( $t_{00}$ ) and water model orthogonal tests ( $t_{01} \sim t_{16}$ )

	方案	ABCD	平均停留 时间/s	死区体积 比例/%	活塞区体 积比例/%	综合 评分
原工况	$t_{00}$	2123	261.67	28.70	13.02	74.32
正交	$t_{01}$	1111	313.12	23.07	12.78	79.71
	$t_{02}$	1222	313.21	23.05	14.00	80.96
	$t_{03}$	1333	293.63	27.85	12.29	74.43
	$t_{04}$	1444	276.67	32.02	13.27	71.25
	$t_{05}$	2123	293.75	27.82	14.09	76.26
	$t_{06}$	2214	307.23	24.51	13.92	79.41
	$t_{07}$	2341	304.18	25.26	15.56	80.30
	$t_{08}$	2432	299.73	26.36	14.50	78.14
	$t_{09}$	3134	309.33	24.00	15.89	81.89
	$t_{10}$	3243	292.63	28.10	15.56	77.46
	$t_{11}$	3312	316.27	22.29	13.10	80.81
	$t_{12}$	3421	325.68	19.98	14.91	84.92
	$t_{13}$	4142	322.98	20.64	17.20	86.56
	$t_{14}$	4231	340.73	16.28	17.28	91.00
	$t_{15}$	4324	327.90	19.44	16.63	87.19
	$t_{16}$	4413	320.29	21.30	15.89	84.58

坝高、堰深、坝堰间距、堰与长水口间距,中间包的综合评分值均有较大的提高,其平均综合评分值为 80.93,相对于原工况提高了 6.61%,其中最大值达到了 91.00。

### 2.1 极差分析

对表 3 中的综合评分值进行极差分析。令  $K_i$  为同一因素  $i$  水平试验结果的平均值,则  $X$  因素下的极差表达式为  $R_X = \max_{i=1}^4 (K_i, X) - \min_{i=1}^4 (K_i, X)$ , 将计算结果列入表 4。

表 4 极差分析表  
Table 4 Range analysis table

$K_i$	A	B	C	D
$K_1$	76.59	81.11	81.13	83.98
$K_2$	78.53	82.21	82.33	81.62
$K_3$	81.27	80.68	81.37	78.18
$K_4$	87.33	79.72	78.89	79.93
$R_X$	10.74	2.48	3.44	5.80

如表 4 所示,  $R_A = 10.74, R_B = 2.48, R_C = 3.44, R_D = 5.80$ , 即  $R_A > R_D > R_C > R_B$ , 即坝高是其主要因素, 4 因素的主次关系依次是 A、D、C、B, 即坝高、堰与长水口间距、坝堰间距、堰深。另外, 从最优化生产条件来看, 哪个因素下的  $K_i$  越大, 说明在该因素  $i$  水平下的相对指标越好。为了直观起见, 通常用因素指标关系图来对结果进行表示, 其具体方法是以各个因素的水平作为横坐标, 以指标的均值作为纵坐标绘制出两者的关系图, 如图 1(c) 所示。可以清晰的看到, 在 A、B、C、D 因素下的  $K_4, K_2, K_2, K_1$  分别为各自因素下的最大值, 即 A4B2C2D1 为该试验条件下的最优因素水平组合。也就是坝高 135 mm、堰深 90 mm、坝堰间距 155 mm 和堰与长水口间距 195 mm 是本试验条件下的最优搭配。

### 2.2 优化试验方案及结果

依据上述的极差分析安排优化试验  $t_{17}$ , 采用前文所述的方法得到的试验数据见表 5。

比较表 3 与表 5 的数据可以清晰地看出, 优化方案  $t_{17}$  较原工况及正交试验中各次试验的死区体积比例小, 活塞区体积比例大, 综合评分达到了 91.01, 达到了优化试验的目的。优化方案  $t_{17}$  能使钢液在中间包中得到充分的混合以及停留, 有利于钢液温度、成分的均匀、稳定, 以及夹杂物的充分上

表 5 优化试验数据表

Table 5 Optimized experiment data

方案	ABCD	平均停留时间/s	死区体积比例/%	活塞区体积比例/%	综合评分
$t_{17}$	4221	341.39	16.12	17.13	91.01

浮, 从而提高铸坯的质量。

### 2.3 夹杂物上浮临界直径的计算

夹杂物上浮近似服从 Stokes 定律<sup>[3,4]</sup>, 由此建立的夹杂物当量直径与时间的关系如式(9):

$$V_s = 2gD^2(\rho_F - \rho_P)/9\mu \quad (9)$$

式中:  $V_s$ - 夹杂物上浮速度/( $m \cdot s^{-1}$ );  $g$ - 重力加速度( $9.8 m/s^2$ );  $D$ - 夹杂物直径/ $\mu m$ ;  $\rho_F$ - 钢液密度,  $7.08 \times 10^3 kg/m^3$ ;  $\rho_P$ - 夹杂物密度,  $3.4 \times 10^3 kg/m^3$ ;  $\mu$ -  $1600^\circ C$  钢液粘度,  $5 \times 10^{-3} kg/ms$ 。

优化试验最短停留时间为 56 s, 试验的时间比为:

$$C_T = \frac{t_m}{t_s} = (1/3)^{1/2} = 0.577 \quad (10)$$

取  $t_m = 56 s$ , 得  $t_s = 97.05 s$ , 在 97.05 s 内夹杂物上浮的最小直径由式(11)计算可得:

$$\frac{1.005}{97.05} = \frac{2D^2(7.08 - 3.4) \times 10^3 \times 9.8}{9 \times 5 \times 10^{-3}} m/s \quad (11)$$

式中: 1.005 m 为原型液面深度。

由式(11)得,  $D = 80.4 \mu m$ , 计算结果说明优化方案  $t_{17}$  中间包内直径大于  $80.4 \mu m$  的夹杂物均能上浮。考虑中间包中钢水上升流, 夹杂物可随着钢液向上的流动而带到一定的高度, 以及夹杂物在此上升过程中的碰撞、黏附等其他去除因素, 实际使夹杂物的上浮更加容易。

### 3 结论

(1) 中间包最佳结构组合为: 坝高 135 mm, 堰深 90 mm, 坝堰间距 155 mm, 堰与长水口间距 195 mm。

(2) 优化方案  $t_{17}$  平均停留时间 341.39 s, 死区体积比例降低到 16.12%, 活塞区体积比例提高到 17.13%, 综合评分达 91.01, 中间包去除夹杂物的临界直径为  $80.4 \mu m$ , 是最佳方案。

### 参考文献

- Sahai Y. Fluid Dynamics of Continuous Casting Tundishes Physical Modeling. Ironmaking and Steelmaking, 1986, 13(5): 241
- 白新桂. 数据分析与试验优化设计. 北京: 清华大学出版社, 1986
- 周 俐, 王建军, 张雪松, 等. 板坯连铸中间包内型优化水模研究. 炼钢, 2003, 19(3): 34
- 张立峰, 蔡开科. 连铸中间包钢水流动及夹杂物去除的研究. 钢铁, 1999, 34(增刊): 405

曹 雄(1984-), 男, 硕士研究生, 冶金过程数值模拟。

收稿日期: 2009-02-05