

## VOD 精炼过程的水模型实验

王 东<sup>1</sup> 包燕平<sup>1</sup> 徐保美<sup>1</sup> 李建民<sup>2</sup> 李志斌<sup>2</sup> 李道明<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 太原钢铁(集团)有限公司,太原 030003)

**摘 要** 通过相当于太钢 75 t 椭圆形钢包容量 1/9 的水模型,采用 N<sub>2</sub> 模拟底吹氩和顶吹氧试验,研究了 VOD 底吹位置和吹气量对钢液混匀时间的影响。试验结果表明,模型合理吹气量为 1.1 ~ 1.3 m<sup>3</sup>/h,相当于 75 t 钢水 VOD 处理的吹气量 350 ~ 460 L/min;单底吹砖位置越靠近钢包中心,混匀时间越短;用双底吹砖或三底吹砖吹气时,混匀时间明显缩短,但存在最佳底砖分布位置。顶底复吹时,为取得较好的效果,亦存在顶吹-底吹气量的最佳配合及相应的有利位置。

**关键词** VOD 精炼 水模型 混匀时间

## Water Model Simulation Test for VOD Refining Process

Wang Dong<sup>1</sup>, Bao Yanping<sup>1</sup>, Xu Baomei<sup>1</sup>, Li Jianmin<sup>2</sup>, Li Zhibin<sup>2</sup> and Li Daoming<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The effect of VOD bottom blowing location and blowing rate on mixing time of molten steel was studied by a water model corresponding to 1/9 volume of the 75 t ladle with oval cross section at Taiyuan Steel. The test results showed that the available blowing rate for model was 1.1 ~ 1.3 m<sup>3</sup>/h corresponding to flowing rate 350 ~ 460 L/min in VOD refining of 75 t molten steel; the location of single blowing brick at bottom was nearer to ladle center the mixing time was shorter; and the mixing time was obviously shorter as bottom blowing with 2 or 3 blowing bricks but there were optimum distribution locations of bottom bricks. There were optimum matching of top blowing rate and bottom blowing rate and corresponding location during top-bottom blowing to get better effect.

**Material Index** VOD Refining, Water Mold, Mixing Time

钢液的混匀效果对发挥 VOD 精炼功能有重要的影响。由于受生产条件限制,太钢二炼钢的 VOD 精炼炉为 75 t 椭圆形钢包。目前,国内还没有对椭圆形钢包的流场及混匀时间进行研究。因此,有必要研究其合理的底吹位置、透气砖数量和底吹气量以及顶底吹炼的合理匹配。

### 1 实验原理及水模型系统的建立

#### 1.1 钢包底吹氩气和顶吹氧气的模拟计算

为了保证模型与原型的流场相似,根据相似原理,除了保证几何相似外,模型与原型之间的佛鲁德准数应该相等。本实验以太钢 75 t 椭圆形钢包为原型,钢包容积为 10.8 m<sup>3</sup>,按 λ = 1/3 制成的有机玻璃模型,则模型与原型的容量比为 1/9。采用 N<sub>2</sub> 模拟底吹 Ar 和顶吹 O<sub>2</sub>,具体数据如表 1。

#### 1.2 氧枪枪位的模拟计算

模拟氧枪顶吹过程时,应该选择冲击坑深度与熔池深度比来进行模拟。钢液熔池的冲击坑深度计算公式如下<sup>[1-3]</sup>:

表 1 VOD 原型和模型之间气量关系/m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>

Table 1 Relation of blowing rate between real VOD unit and model /m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>

项目	底吹氩气	顶吹氧气
原型	16.9 ~ 33.8	1 100 ~ 1 500
模型	0.8 ~ 1.6	28.49 ~ 38.85

$$L = L_n \times \exp(-0.78 h/L_n) \quad (1)$$

$$\text{且 } L_n = 63.0 \times (K \cdot F_{O_2} / n \cdot d)^{2/3} \quad (2)$$

式中: L<sub>n</sub>-当 h = 0 时,熔池的冲击坑深度/mm; h-氧枪的枪位/mm; K-与氧枪喷射角有关的常数,喷射角大于 10°, K = 1; F<sub>O<sub>2</sub></sub>-顶吹氧气流量/m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>; n-喷孔数; d-喷孔喉口直径/mm。

由式(1)、(2)计算原型在不同枪位下的冲击坑深度。因为原型熔池深度已知 H<sub>钢</sub> = 1 764 mm,模型中水的深度 H<sub>水</sub> = 588 mm。因此可计算出冲击坑深度与熔池深度的比值。

模型的枪位可用下式计算:

$$d \cdot v = a \cdot (h + L) \cdot \sqrt{L} \quad (3)$$

式中:  $d$ -模型喷嘴直径/mm;  $v$ -喷嘴出口的表观速度/ $m \cdot s^{-1}$ ;  $a$ -水的情况下,  $a = 0.416$ ;  $L$ -模型的冲击坑深度/mm;  $h$ -模型的枪位/mm。

根据相似原理计算结果如表 2。

表 2 VOD 原型与模型的枪位/mm

Table 2 Lance level for real VOD unit and model /mm

原型	模型
1 600	101
1 700	113
1 800	125

## 2 实验方法及方案

### 2.1 试验方法

“刺激-响应”实验是用来测量钢包内钢液混匀时间的有效手段。本实验采用中国水利科学研究所的 DJ800 水工测量仪, 测量是在有机玻璃制成的钢包模型完成, 测点及示踪剂注入位置如图 1 所示(图中黑圆点为底吹砖位置, 数字代表其编号)。KCL 溶液由顶部的漏斗注入钢包模型中, 每次加入量都是固定的 300 mL, 浓度为 4 L/mol, 每个工况下测量 3 次混匀时间。

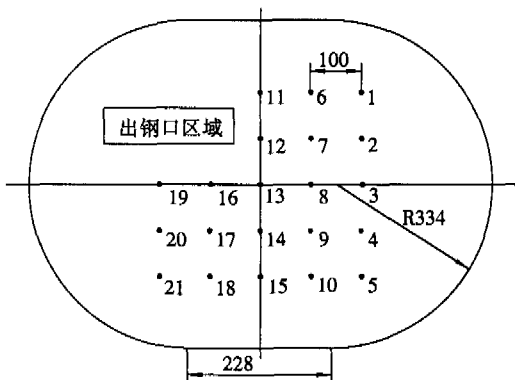


图 1 模型钢包底吹位置示意图

Fig.1 Schematic of bottom blowing location of model ladle

### 2.2 试验方案

实验过程中需要改变底吹位置, 为了便于描述具体的底吹位置, 下文出现的如 1-21 这样的标记表示 1 号和 21 号两底吹砖同时吹气; 9-7-17 表示 9 号 7 号 17 号三个底吹砖同时吹气。具体实验方案如下:

(1) 底吹砖的位置对混匀时间的影响。固定底吹气量, 分别在单底吹砖、双底吹砖和三底吹砖

情况下, 研究了混匀时间的变化规律, 得到优化的底吹位置。

(2) 吹气量对混匀时间的影响。固定底吹气位置, 改变吹气量测量混匀时间, 找出底吹气量与混匀时间的关系。

(3) 真空对混匀时间的影响。固定底吹气量和底吹位置, 改变真空度测量混匀时间, 找出真空度对混匀时间的影响。

(4) 顶底复吹情况下混匀时间的研究。固定顶吹气量( $20 m^3/h$ )和底吹位置, 改变底吹气量测得混匀时间, 找出顶底气量对混匀时间的影响。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 单底吹砖位置的优化

表 3 可见, 底吹位置越靠近钢包中心, 混匀时间越短。最佳位置在 13 号即钢包的底面中心。大量实验证明, 底面为圆形的钢包单底吹砖吹气的最佳位置在距离钢包中心  $R/4 \sim R/2$  之间。说明底面为椭圆形钢包和圆形钢包在单底吹砖底吹的优化方面有很大的区别。但如果将这个椭圆形钢包看作是部分重叠的两个圆形钢包的组合, 由于圆形钢包的优化位置在距离中心  $R/4 \sim R/2$ 。因此, 椭圆形钢包的优化位置在其中心是合理的。

表 3 单底吹砖的底吹位置对混匀时间的影响

Table 3 Effect of bottom blowing location of single brick on mixing time

底吹位置	混匀时间/s
1	124
2	158
3	122
7	100
13	93

### 3.2 双底吹砖位置的优化

从表 4 实验数据可以看出, 关于椭圆长轴对称布置吹气位置时, 只有在 11-15 底吹时, 混匀效果较好。其它位置的混匀效果不理想, 这主要因为在钢包长轴的另一侧布置底吹砖底吹时, 由于椭圆形钢包长轴方向长, 所以对另一侧的搅拌作用降低, 因此这样不对称的搅拌方式对椭圆形钢包作用效果不明显。

关于椭圆形钢包中心对称布置底吹位置时, 混匀时间普遍比较短, 6-18 和 1-21 两个位置底吹的混匀效果更优。因此, 对于椭圆形钢包来讲, 底吹孔的布置最好成中心对称, 而且两底吹砖距离

表 4 双底吹砖轴对称布置和中心对称布置吹气位置的混匀时间

Table 4 Mixing time by bottom blowing of 2 blocks at location with axis symmetry layout and center symmetry layout

轴对称		中心对称	
吹气位置	混匀时间/s	吹气位置	混匀时间/s
1-5	214	1-21	77
2-4	211	2-20	85
6-10	183	3-19	96
7-9	162	6-18	73
11-15	82	7-17	84
12-14	97	8-16	80
		11-15	82
		12-14	97

钢包中心不宜太近。如果两底吹砖布置的太近,气流在上升过程中容易汇聚成一股气流,达不到双底吹砖底吹的目的。

### 3.3 三底吹砖位置的优化

从表 5 可以看到,只有在 9-7-17 位置底吹时的混匀时间较短。而其它位置的混匀效果并不理想。适当紧凑布置底吹砖时,混匀效果较好。3 个底吹砖的位置离中心不能太远,虽然此时的底吹搅拌面积大,但液体获得的动能相对较少,而且由于流动混乱,液体动能抵消严重;同时 3 个底吹砖的距离不能太近,若太近则气流股容易在上升的过程中汇聚成一股,相当于单底吹砖底吹,混匀效果将不会理想。所以三底吹砖位置的布置比较复杂,对实际生产的应用意义不大。

表 5 三底吹砖底吹位置布置对混匀时间的影响

Table 5 Effect of bottom blowing location layout with 3 blowing bricks on mixing time

底吹位置	混匀时间/s
5-11-19	113
5-6-20	95
9-12-16	82
9-7-17	71

### 3.4 底吹气量对混匀时间的影响

无论是单底吹砖还是双底吹砖吹气,随着气量的增加,混匀时间不断减少,当吹气量超过一定量(约  $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ )后,椭圆形钢包内液体的混匀时间会明显下降,当继续增大气量( $> 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ )时,混匀时间减少的趋势开始缓慢。

在采用较小气量( $0.8 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ )底吹时,单底吹砖和双底吹砖底吹时的混匀时间相差很大;而采用较大气量( $1.4 \sim 1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ )底吹时,单底吹砖和双底吹砖底吹时的混匀时间相差较小。这说明若实际生产中采用较小气量底吹时,优化底吹

的位置是非常必要的。

### 3.5 顶底复吹情况下混匀时间的研究

表 6 可见,在顶吹气量不变的情况下,改变底吹气量,混匀时间是变化的,但没有明显的规律。并且在本实验所研究的气量范围内,混匀时间都存在一个最小值。这说明顶底复吹时并不是气量越大对钢液的混匀效果越好,而是顶吹气量和底吹气量要有一定的配合。而且这样的配合与具体的底吹位置有关。

表 6 顶底复吹时底吹气量对混匀时间的影响/s

Table 6 Effect of bottom blowing rate on mixing time in condition of top-bottom combined blown /s

底吹位置	底吹气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$			
	1.0	1.2	1.4	1.6
1-5	107	99	67	73
8-16	96	76	94	86
1-21	59	71	81	75

## 4 结论

(1) 单底吹砖位置越靠近钢包中心,混匀时间越短。吹气最佳位置在钢包底中心;钢包底部中心布置两底吹砖时,混匀时间短,6-18 和 1-21 的混匀效果较好;三底吹砖布置不是所有情况效果都好,只有在 7-9-17 底吹时,效果比较明显,且有些位置底吹混匀效果不如双底吹砖。

(2) 随着底吹气量的增加,混匀时间急剧减少,当吹气量超过  $1.4 \text{ m}^3/\text{h}$  时,混匀时间呈下降趋缓。合理的吹气量为  $1.1 \sim 1.3 \text{ m}^3/\text{h}$  (相当于生产实际的  $350 \sim 460 \text{ L}/\text{min}$ )。

(3) 顶底复吹时,为了取得较好的混匀效果,顶吹和底吹的气量要有一定的配合,这种配合与底吹位置有很大的关系。因此必须综合考虑底吹位置和顶底气量的配合。

### 参考文献

- 金培洪,刘承军. 炼钢冷态相似模拟理论及应用. 宝钢技术, 1998(1)
- 刘朝宽,严友梅,李宪文,等. 转炉顶底复合吹炼的水力学模拟研究. 第三届冶金过程动力学和反应工程学术会议论文集(下),重庆,1986:131
- 肖兴国,谢蕴国. 冶金反应工程学基础. 北京:冶金工业出版社,1997

王东(1978-),男,硕士研究生,从事钢包、中间包及结晶器的水模拟研究。

收稿日期:2005-11-04