

## 150 t 钢包底吹氩喷嘴布置优化的水模型研究

陈序 包燕平 林路

(北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083)

**摘要** 针对钢厂 150 t 底吹氩钢包于 0.2 R 圆周上成 90° 布置的双孔吹氩, 钢水成分和温度均匀性较差的问题, 进行了几何相似比 1:4, 双孔吹氩位置 0.2~0.8 R, 夹角 45°~180°。吹气量 54.6~491.4 L/h (相当于 150 t 钢包吹气量 50~450 L/min) 的水模型试验。试验结果表明, 最优方案为双孔半径 0.6 R 圆周, 夹角 180°, 每孔流量 382.2 L/h (相当于 150 t 钢包 350 L/min), 混匀时间比原钢包的喷嘴布置减少 28.6%。

**关键词** 150 t 钢包 底吹氩 喷嘴布置 混匀时间 水模型试验

## A Study on Water Model for Optimum Location of 150 t Ladle Bottom Blowing Argon Nozzle

Chen Xu, Bao Yanping and Lin Lu

(State Key laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** In accordance with the issue of poor homogeneity of composition and temperature of liquid in 150 t ladle bottom-argon-blowing with double nozzle located at 0.2 R circumference in angle 90°, a test by using geometric similarity 1:4 water model with double nozzle location 0.2~0.8 R, in angle 45°~180°, blowing rate 54.6~491.4 L/h (corresponding 150 t ladle blowing rate 50~450 L/min) has been carried out. Test results show that as compared with original ladle nozzle location, for the optimum scheme- double radius 0.6 R circumference, in angle 180° and each nozzle flow rate 382.2 L/h (corresponding 150 t ladle 350 L/min) the mixing time of liquid decreases by 28.6%.

**Material Index** 150 t Ladle, Bottom Argon Blowing, Location of Nozzle, Mixing Time, Water Model Test

底吹氩钢包具有成本低、操作简单、安全性高<sup>[1]</sup>、均匀钢液温度和成分以及减少钢中的夹杂<sup>[2]</sup>等优点和精炼功能。本研究对该 150 t 钢包精炼底吹氩进行了无顶渣的水模型试验, 优化其最佳喷吹位置。

### 1 实验原理和方法

对于钢包底吹氩系统来说, 引起体系内流动的动力主要是气泡浮力而不是湍流的粘性力, 因此, 保证模型与原型的修正弗鲁德准数相等, 就能基本上保证它们的动力学相似<sup>[3,4]</sup>。

#### 1.1 几何相似

模型与实际设备尺寸相似比为 1:4, 保证几何相似, 具体尺寸如表 1 所示。

#### 1.2 动力学相似

表 1 钢包模型和原型的尺寸 /mm

Table 1 Size of prototype and model of ladle /mm

项目	钢包上部		钢包下部		透气塞 顶面直径	熔池 高度
	深度	长轴	短轴	长轴		
原型	3 890	3 303	3 003	2 955	2 655	135
模型	973	826	751	739	664	34

实验中采用向水中吹入氮气的方法来模拟现场的氩气吹入。用修正的弗鲁德准数相等来换算实验中的实际吹气量。可得出:

$$Q_m = 0.0185 Q_{real} \quad (1)$$

式中:  $Q_m$ - 实验中常温常压实际气体流量;  $Q_{real}$ - 现场生产过程中常温常压下气体流量。表 2 为对应的气体流量关系(每个单孔)。

#### 1.3 实验方法

表 2 原型和模型的底吹气量

Table 2 Bottom blowing flow rate of prototype and model of ladle

原型流量/(L·min <sup>-1</sup> )	模型流量/(L·h <sup>-1</sup> )
50	54.6
100	109.2
150	163.8
200	218.4
250	273.0
300	327.6
350	382.2
400	436.8
450	491.4

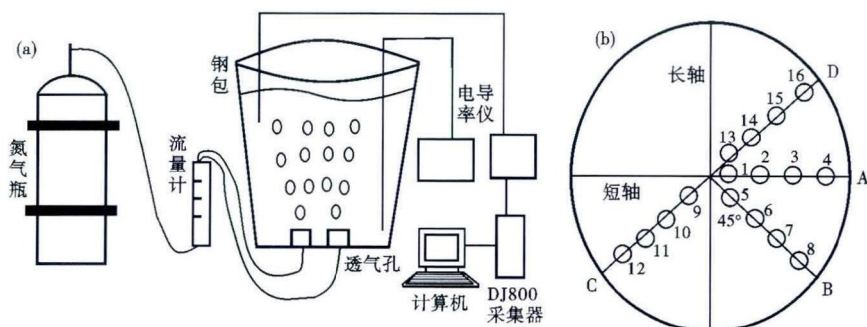


图 1 实验装置示意图(a)和钢包底部吹气孔布置图(b)

Fig. 1 Schematics of experimental device (a) and location for ladle bottom blowing nozzles (b)

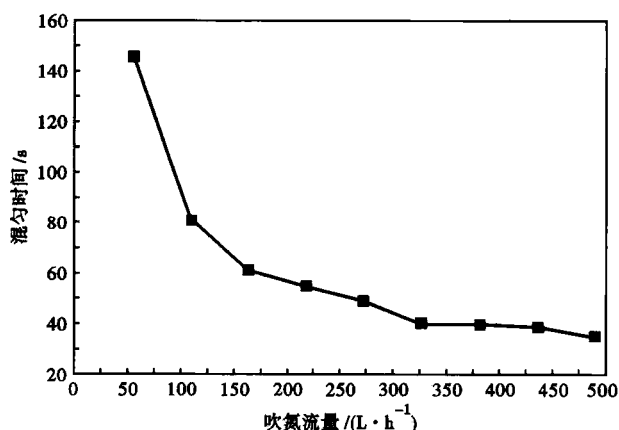


图 2 原型方案各吹气流量下的混匀时间, 0.2 R, 90°

Fig. 2 Mixing time of liquid of prototype ladle in different gas flow rate, 0.2 R, 90°

(1) 混匀时间的测定。实验从混匀时间指标出发,通过“刺激响应”的技术来测定。实验以饱和 KCl 溶液为示踪剂,采集其浓度得到 RTD 曲线。为了获得熔池的真实的混合情况,尽量放在混合最慢的位置,如包底死角等。混匀时间的定义以 95% 的混合度为妥。实验数据采集时间为 180 s,采集数据时间间隔为 0.05 s<sup>[5-8]</sup>。实验每个测量点,重复测量 4 个实验数据,取其余实验数据的平均值作为该测量点的实验结果。实验装置如图 1(a)所示。

(2) 典型流场照相。在不同的试验情况下,向钢包中加入一定量的饱和高锰酸钾溶液,进行录像和拍照以帮助记录试验过程及进展。

### 2 实验方案及结果分析

原型吹氮双孔位于 0.2 R 圆周上成 90° 布置(5 和 9)。设计实验吹氮孔所在圆周位置为:0.2, 0.4, 0.6, 0.8 R 上,夹角分别为 45°, 90°, 135°, 180°。模型钢包底部吹氮孔布置如图 1(b)所示。

### 2.1 双孔吹气位置优化实验

(1) 原型方案。由图 2 可见,原型方案随着吹气流的增加,混匀时间逐渐降低,吹气流量超过 327.6 L/h 时,即使流量增大,用于搅动熔池的能量已经足够,其余的能量用于翻滚液面,并没有对混匀时间造成较大的影响。同时原方案吹气孔相距较近,在吹气过程中气流扰动比较大,不利于混匀时间的改善和夹杂物的上浮。

较大吹气量下,观察到气体流股上升到钢包一定高度时会对钢包壁面产生冲刷,因此,不建议实际生产中使用过大吹气量。可以认为在原型吹气孔位置方案中的临界吹气流量约为 327.6 L/h,折算成实际的吹氮流量为 300 L/min,在此临界吹氮量下,实验中混匀时间为 39.6 s。

(2) 双孔布置成 90° 夹角时,随着吹气量越大,混匀时间越短,当吹气量超过 327.6 L/h 时,混匀时间变化不大,而且各布置条件下,混匀时间也相差不多。当吹气孔位于 0.8 R 处(8 和 12)时,混匀时间最小,在吹气量为 327.6 L/h 时,混匀时间较原型布置方案缩短了 9.2 s,降幅 23.2%。主要是由于两透气塞距离较远,两螺旋上升的气液两相流相互干扰小,搅拌能损失小,因而得到较小的混匀时间。但两吹气孔位置离钢包壁较近,对钢包壁冲刷较大。

(3) 双孔布置成 135° 夹角时,位于 0.8 R (4 和 12) 处,钢包混匀时间最小。同样当吹气量超过 327.6 L/h 时,混匀时间变化不大。因此,此情况下得到最小混匀时间的双孔吹气方案为双孔在半径 0.8 R 圆周上成 135° 布置,吹气量为 436.8 L/h,模型混匀时间为 28.7 s,较原型布置方案混匀时间降低了 9.8 s,降幅 25.5%。

(4) 双孔布置成 45° 夹角时,当吹气量超过 382.2 L/h 时,混匀时间变化不大。吹气孔位于 0.8 R 处(4 和 8),在吹气量为 382.2 L/h 时混匀时间最小,为 24.6 s,较原型布置方案缩短了 13.9 s,降幅 36.1%。两吹气孔也距离钢包壁较近,对钢包壁冲刷较大。

(5) 双孔布置成 180° 夹角时,当吹气量超过 382.2 L/h 时,混匀时间变化不大。因此,综合考虑流量和钢包壁冲刷,得到夹角为 180° 时混匀时间最优方案为双孔在各自半径 0.6 R 圆周上成 180° 布置(11 和 15),吹气量为 382.2 L/h,模型混匀时间为 27.5 s,

较原型布置方案混匀时间降低了11 s,降幅28.6%。

单从混匀时间看,优化后双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置和双孔在半径0.8 R圆周上成45°布置的方案,总体上低于其他两优化方案,其中较优方案为双孔在半径0.8 R圆周上成45°布置(4和8),吹气量为382.2 L/h。次优方案为双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置(11和15),吹气量为382.2 L/h。但优化后双孔在半径0.8 R圆周上成45°布置(4和8)的方案由于吹气孔距包壁较近,气流对钢包壁面的冲刷严重。为减少对钢包内衬耐火材料的冲刷,最合适的优化方案为双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置,吹气流量最好控制在(单孔)327.6~436.8 L/h,折合成实际吹氩流量为300~400 L/min。

## 2.2 双孔流场显示实验

主要针对原型布置方案位置吹气量分别为109.2 L/h和436.8 L/h时的流场情况和优化后双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置(11和15),吹气量分别为109.2 L/h和436.8 L/h时的流场情况,从染色实验录像中截取实验照片进行观察对比。

在原型位置布置方案,吹气量为109.2 L/h的情况下,加入示踪剂10 s后扩散明显。20 s后基本在钢包表面平铺开,撞到钢包壁并且沿壁面向下扩散。到达钢包底部的液体逐渐向包底中心扩散,这样便形成一个大的回流,同时在大回流的附近形成大量小的回流。待到40 s后,示踪剂基本混匀,遍布整个钢包。但也可观察到钢包底部远离吹气孔的地方染色明显比其它区域浅,可知钢包近液面是流动活跃区,而钢包底部远离吹气孔一侧是流动不活跃区即死区。而在原型位置,吹气量为436.8 L/h的情况下,流动形式基本不变,流场大致相同,但流动明显加快。同样是加入示踪剂10 s后,染色液体基本在钢包表面平铺开,向下扩散明显。待到25 s后,示踪剂基本混匀,遍布整个钢包。但同样也可观察到回流现象和流动不活跃区。

在优化位置即双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置(11和15),吹气量为109.2 L/h的情况下,加入示踪剂后扩散效果明显优于同一吹气量下原型位置的情况。10 s后染色液体基本在钢包表面平铺开,并且向下扩散到钢包深度一半的位置。待到30 s后,示踪剂基本混匀,遍布整个钢包。可以观察到流动明显快于同一吹气量下原型位置的情况,并且钢包底部远离吹气孔一侧的流动不活跃区明显小于原型位置的情况。在优化位置即双孔在半径

0.6 R圆周上成180°布置(11和15),吹气量为436.8 L/h时的情况下,流动形式基本不变,流场也大致相同,但流动明显快于同一吹气量下原型位置的情况和同样优化位置下吹气量为109.2 L/h时的情况。可以观察到加入示踪剂5 s后染色液体基本在钢包表面平铺开,并且开始碰撞钢包壁,向下扩散。10 s后染色液体基本向下扩散到明显超过钢包深度一半的位置。待到20 s后,示踪剂基本混匀,遍布整个钢包,并且流动不活跃区明显减小。

从流场显示实验可以看出,吹气量为436.8 L/h时钢包内钢液的流动明显比吹气量为109.2 L/h时的情况快。同时,在相同流量下,优化后双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置的方案其钢液流动比原型布置方案快,优化效果明显。

## 3 结论

(1)原型钢包底吹氩位置不尽合理,由双孔吹气方案优化结果得出,最优方案为双孔在半径0.6 R圆周上成180°布置,最优吹气量为一个孔382.2 L/h(转换为现场实际吹氩流量为350 L/min),优化后模型混匀时间较原型降低了11 s,降幅28.6%。

(2)由于双孔在半径0.8 R圆周上成45°布置方案的吹气孔距包壁较近,气流对钢包壁面的冲刷严重,未被采纳。

(3)从流场显示试验可以验证,优化后方案比原方案钢液流动快,混匀效果好。

## 参考文献

- [1] 韩丽辉,李晓云,刘云. 70 t底吹氩钢包水模型实验[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(4): 29-33.
- [2] 张鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [3] 幸伟,倪红卫,沈巧珍,等. 130 t钢包底吹氩喷嘴布置模式优化的水模型试验[J]. 特殊钢, 2007, 28(4): 13-15.
- [4] 朱苗勇,萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [5] 马文俊,包燕平,崔衡,等. LCAK钢CAS精炼过程的物理模拟[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(8): 887-890.
- [6] 金友林,包燕平,岳峰,等. 210 t钢包CAS精炼混匀时间的水模型实验研究[J]. 炼钢, 2007, 23(6): 36-39.
- [7] 沈巧珍,阳方,彭琦,等. 230 t钢包搅拌效果和去夹杂水模型研究[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(1): 1-3.
- [8] Pan Y H, Bjorkman B. Numerical Analysis on the Similarity Between Steel Ladles and Hot-water Models Regarding Natural Convection Phenomena[J]. ISIJ International, 2002, 42(1): 43-54.

陈序(1988-),男,硕士研究生(北京科技大学),2011年北京科技大学毕业,二次精炼技术,洁净钢工艺研究。

E-mail: chen\_xu0806@yahoo.cn

收稿日期:2013-05-31