

## 100 t 单咀真空精炼炉底吹位置的优化

张利君<sup>1</sup> 宁林新<sup>1</sup> 孙硕猛<sup>2</sup> 朱志远<sup>2</sup>

(1 首钢集团技术研究院,北京 100043; 2 秦皇岛首秦金属材料有限公司,秦皇岛 066000)

**摘要** 结合钢厂 100 t 单咀真空精炼炉相关参数,运用数值模拟的方法对脱气时单咀炉内的钢液流场进行了仿真计算,分析单咀炉内钢液流动的基本特征,研究了距底部圆心 0.1~0.424 m 吹气位置对钢液流场、钢液循环流量和混匀时间的影响。结果表明,原吹氩位置(距底部中心 0.424 m),大部分氩气没有进入浸渍管,为避免氩气逸出,吹气孔距圆心应 $\leq 0.3$  m;随吹气位置至圆心距离增大,钢水混匀时间减小,综合考虑钢液脱气效果和浸渍管寿命,最佳吹气位置应为距底部中心 0.25~0.3 m 处。

**关键词** 单咀真空精炼炉 流场 数值模拟 循环流量 吹气位置

## Optimization of Bottom Gas Blowing Position in 100 t Vacuum Refining Furnace with Single Snorkel

Zhang Lijun<sup>1</sup>, Ning Linxin<sup>1</sup>, Sun Shuomeng<sup>2</sup> and Zhu Zhiyuan<sup>2</sup>

(1 Research Institute of Technology, Shougang Group, Beijing 100043;  
2 Qinhuangdao Shouqin Metal Material Co Ltd, Qinhuangdao 066000)

**Abstract** Combined with relative parameters of a 100 t vacuum refining furnace with single snorkel at steel works, the imitated calculation for liquid field in degassing of vacuum refining furnace with single snorkel has been carried out by numerical simulation method to analyze the basic characteristics of liquid flow in furnace with single snorkel, and the effect of blowing position with distance from bottom center 0.1~0.424 m on liquid flow field, liquid circulation rate and mixing time is studied. Results show that for origin argon blowing position (distance from bottom center 0.424 m) the most argon doesn't enter into snorkel, in order to avoid argon escape, the blowing nozzle distance from bottom center should be  $\leq 0.3$  m, with increasing blowing nozzle distance, mixing time of liquid decreases, and combined considering the effect of liquid degassing and life of snorkel, the optimum gas blowing position is at distance from bottom center 0.25~0.3 m.

**Material Index** Vacuum Refining Furnace with Single Snorkel, Flow Field, Numerical Simulation, Circulating Rate, Gas Blowing Position

单咀真空精炼炉(RED A)是一种新的真空脱气工艺,它用一个大的浸渍管来代替 RH 的上升管和下降管,用钢包底部吹气代替 RH 的上升管吹气,其脱气和脱碳效果都要优于 RH 工艺<sup>[1]</sup>。由于 RED A 属于新工艺,仍有一些技术不太成熟,如钢包底部吹气孔的布置以及吹气量的控制等。仿真模拟利用 CFD 流体力学软件,建立钢厂 100 t 单咀真空精炼炉的数学模型,计算不同吹气位置下的钢液的流动形态,并采用组分传输方法计算得出钢液的混匀时间和循环流量。

### 1 单咀真空精炼炉的物理数学模型

以钢厂 100 t 单咀真空精炼炉为计算对象,其物理模型见图 1,钢包的相关尺寸参数及钢液物性参数见表 1。在钢包原型中,吹氩口位于钢包底部距圆心 0.424 m 处。

#### 1.1 基本假设

为了便于建立模型,实验作如下假设:①不考虑

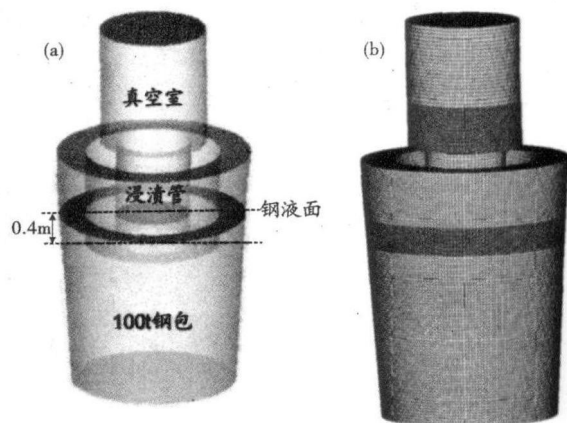


图 1 单咀真空精炼炉的物理模型(a)及网格划分(b)  
Fig. 1 Physical model (a) and mesh grid (b) of vacuum refining furnace with single snorkel

温度场对流动的影响;②气泡的浮力是驱动钢液循环流动的主要驱动力<sup>[2]</sup>;③氩气泡间互不影响,在上升过程中不合并或分裂;④氩气泡在真空室的液面处全部逸出。

表 1 100 t 单咀真空精炼炉的结构及钢液物性参数

Table 1 Liquid physical parameters and structure of a 100 t vacuum refining furnace with single snorkel

钢包 容量/t	真空室 内径/m	吹氩口 直径/m	钢包/m			浸渍管/m			钢液物性参数		
			上口径	下口径	高度	外径	内径	长度	浸入深度	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )
100	1.584	0.08	2.9	2.4	3.58	2.0	1.1	0.975	0.4	7 020	0.005 5

## 1.2 控制方程

单咀真空精炼过程钢包内钢水的流动可视为等温、不可压缩湍流流动<sup>[3]</sup>,描述钢液流动的基本控制方程有连续性方程、动量方程以及湍流  $\kappa\text{-}\varepsilon$  方程,其具体表达式见文献[4]。由于单咀炉内的流动属于典型的多相流,计算使用欧拉多相流模型来模拟炉内的气液多相流动,对欧拉模型的具体描述见文献[5-6]。

## 1.3 边界条件

(1)入口:钢包底部的吹氩口为模型的入口边界,吹氩量为 400 L/min,其速度方向与入口垂直,体积分数为 1。

(2)出口:真空室出口处设为压力出口边界条件,氩气在边界处逸出,真空度为 100 Pa;钢包内的钢液面也设为压力出口边界,氩气在钢液面逸出,压力值设为 101 325 Pa。

(3)壁面:采用无滑动边界条件,即壁面处的速度为 0 m/s。

(4)初始条件:单咀炉内钢液的初始速度设为 0 m/s。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 单咀炉采用原吹气位置的效果分析

#### 2.1.1 单咀炉内钢液流动的基本特征

图 2 为当吹氩孔位于距钢包底部中心 0.424 m (原吹气位置)处时,单咀精炼炉的钢液流动情况。从图 2(a)中可以看出,氩气泡上浮做功带动钢液经过浸渍管进入真空室后,钢液在重力的作用下由真空室流至钢包内,在浸渍管的另一侧向下流动,真空室内的钢液得到更新。由此可见,对于单咀精炼炉来说,浸渍管同时起到了 RH 的上升管和下降管的作用。同时,由于浸渍管的管径较大,钢液对耐火材料的冲刷也较 RH 有所减小。

从图 2(b)中可以看出,气泡柱附近的钢液速度最大,速度梯度变化最明显,湍动能耗散最大;浸渍管壁面的钢液次之,钢包其他区域钢液速度较均匀。值得注意的是,在吹气孔的上方,一部分钢液直接冲击到浸渍管的底部耐火材料,并从钢包自由液面逸出;另一部分钢液则沿着浸渍管的管壁向真空室运

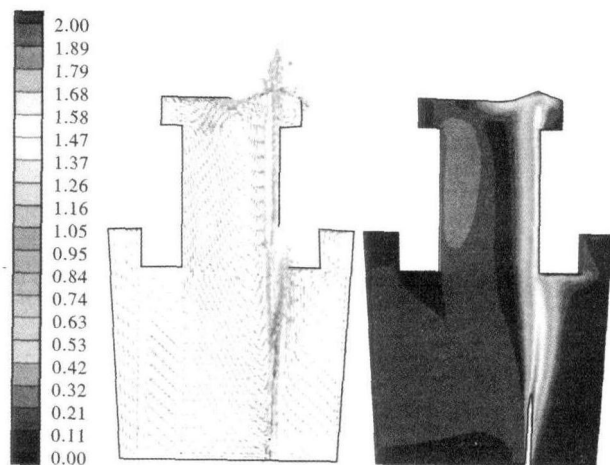


图 2 单咀精炼炉内的钢液流场:(a)速度矢量图;(b)速度云图  
Fig. 2 Flow field of liquid in vacuum refining furnace with single snorkel: (a) velocity vector diagram; (b) velocity cloud diagram

动,对浸渍管壁面耐火材料的侵蚀较为严重,因此需要对钢包底部的吹气位置进行调整。

图 3 为氩气在单咀炉中的运动情况,并给出了真空室内钢液面的速度矢量图。当氩气运动到真空室钢液面时,在钢液面产生一个大的凸起,大部分钢液迅速改变方向,呈水平运动,在界面形成一个水平流动区。钢液速度在气泡柱的冲击区域最大,向四周逐渐减小。钢液在真空室形成水平流动后因重力作用流回钢包,在钢包和真空室间形成一大环流,这个环流促使钢液在钢包和真空室内进行循环运动,达到精炼的目的。

#### 2.1.2 钢液混匀时间和循环流量的计算

通过在单咀 RH 稳定流场中,从真空室中心投入一定量的示踪剂,跟踪监测点的示踪剂浓度随时

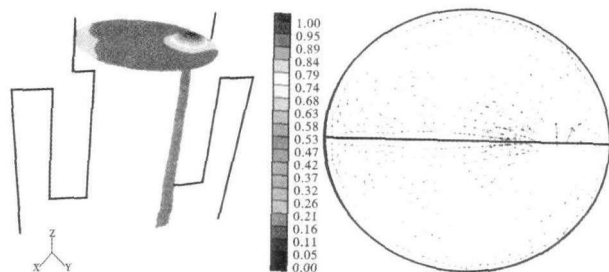


图 3 氩气在单咀真空精炼炉中的运动  
Fig. 3 Argon movement in vacuum refining furnace with single snorkel

间的变化曲线,同时计算不同位置点的示踪剂浓度的标准偏差,当标准偏差小于某一个设定值时,认为投入的示踪剂已经全部混匀,该时刻为钢液的混匀时间。图4为示踪剂监测点的位置。从图5看出,不同位置点的示踪剂浓度随时间的变化规律基本相同,最终都趋于一个恒定的浓度值。监测点浓度的标准偏差越早趋于恒定,说明钢包内不同位置越快达到均匀浓度,则混匀时间越短。通过仿真计算,当吹氩位置距圆心位置0.424 m时,混匀时间为188 s。而对于循环流量的计算,则通过统计浸渍管入口处向上运动钢液的质量流量得出的。当吹氩位置距圆心位置0.424 m时,循环流量为38.6 t。

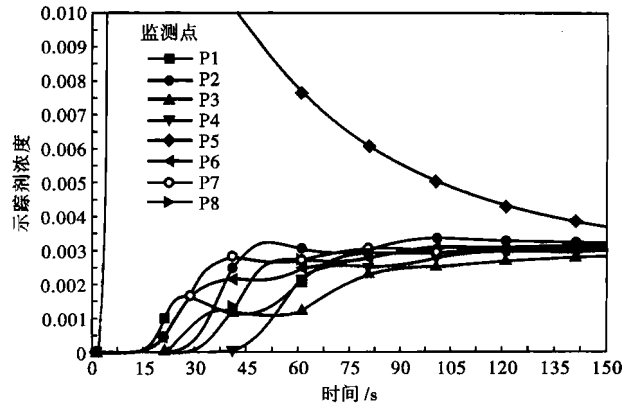


图5 示踪剂浓度随时间的变化曲线,距圆心0.424 m  
Fig. 5 Curves of tracer concentration change with time, blowing nozzle distance from bottom center 0.424 m

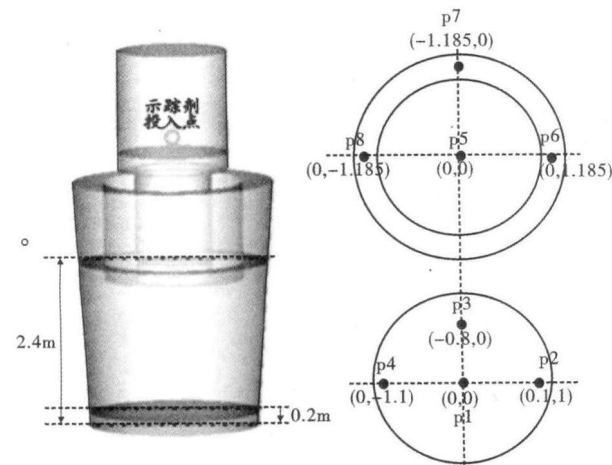


图4 试验监测点位置  
Fig. 4 Position of monitor points in test

### 2.2 吹气位置对流场的影响

从图6中可以看出,当吹气孔位于距钢包圆心0.424 m(原吹氩口位置)处时,钢液对浸渍管底部耐火材料的冲刷最为严重,浸渍管底部的钢液速度较大,钢液流动的高速区主要位于浸渍管壁面附近。随着吹气孔向钢包中心的移动,钢液流动的高速区也随之向中心移动,对浸渍管侧壁和底部耐火材料的冲刷速度逐渐减小。

图7为单咀炉内氩气在浸渍管入口处的体积分数云图。从图7中可以看出,当吹氩口位于距圆心0.424 m处(原吹氩口位置)时,很大一部分氩气没有进入浸渍管,而是从钢包表面逸出,导致钢包表面的液面波动较大,削弱了氩气对钢液的搅拌作用,

从而降低了钢液的脱气和脱碳效果。因此,原吹氩孔的位置设计并不合适,影响了现场的生产效果。当吹氩孔移动至距圆心0.3 m的位置时,可以基本保证氩气全部进入浸渍管,避免氩气的逸出及对浸渍管的冲刷,保证氩气对钢液的搅拌效果。随着吹气孔向钢包中心的移动,此种效果就越为明显。

### 2.3 吹气位置对钢液循环流量及混匀时间的影响

图8(a)为混匀时间随吹气位置的变化曲线。从图8(a)中可以看出,当吹气孔距圆心距离小于0.2 m时,混匀时间随距圆心位置的增加而略有增加,但变化很小。当吹气孔距圆心位置大于0.2 m时,混匀时间随着距圆心位置的增加而减小,尤其是当距离大于0.3 m时,混匀时间减小的更加明显,混匀效果增大。但根据流体计算结果可知,当吹气位置距圆心距离大于0.3 m时,会有氩气逸出浸渍管,易导致浸渍管壁面冲刷严重及自由液面流动较大,因此不建议吹气位置距圆心距离大于0.3 m。

图8(b)为钢液循环流量随吹气位置的变化曲线。从图8(b)中可以看出,循环流量随着吹气位置

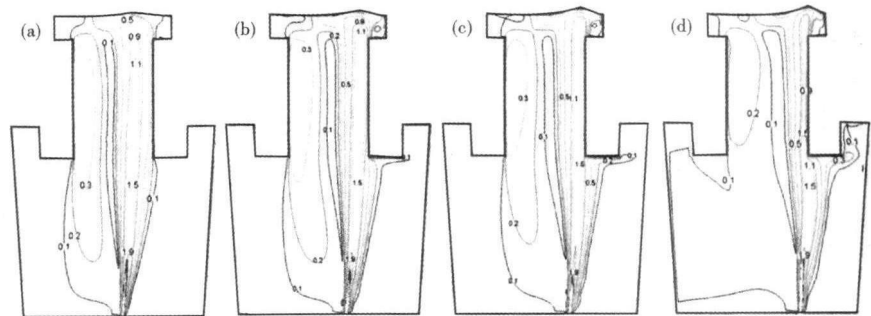


图6 吹气位置对钢液速度场的影响:距圆心0.1 m(a);0.2 m(b);0.3 m(c);0.424 m(d)  
Fig. 6 Effect of blowing position on liquid velocity field: blowing nozzle distance from bottom center- 0.1 m (a), 0.2 m (b), 0.3 m (c) and 0.424 m (d)

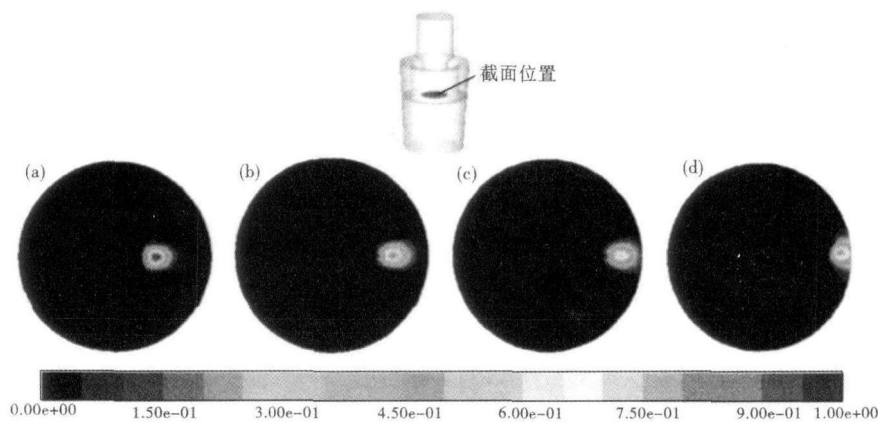


图 7 吹气位置对浸渍管内氩气的体积分数的影响:距圆心 0.1 m (a);0.2 m (b);0.3 m (c);0.424 m (d)

Fig. 7 Effect of blowing position on volume percentage of argon in snorkel: blowing nozzle distance from bottom center- 0.1 m (a), 0.2 m (b), 0.3 m and 0.424 m (d)

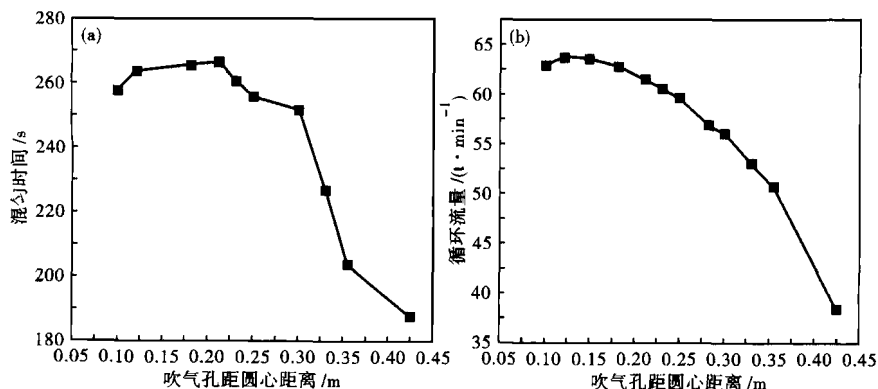


图 8 吹气位置对钢液混匀时间(a)和钢液循环流量(b)的影响

Fig. 8 Effect of blowing position on liquid mixing time (a) and liquid circulation rate (b)

距圆心距离的增大而减小。当吹气孔距圆心 0.424 m (原吹气位置) 时循环流量最小, 为 38.6 t。随着吹气孔向钢包中心的移动, 钢液循环流量逐渐增大, 当吹气孔位于距圆心 0.3 m 处, 循环流量增加至 56 t/min。

在实际生产中, 吹气位置的选取应综合考虑钢液的脱气效果、脱气速度及浸渍管耐火材料的使用寿命。根据实验计算结果, 吹气孔应选在距钢包底部中心 0.25 ~ 0.3 m 的位置处, 在保证气体不逸出的前提下, 得到钢液具有最大的循环流量和较快的混匀速度。

### 3 结论

(1) 单咀精炼炉中, 钢液在氩气泡浮力的作用下, 在浸渍管内形成了一个回流, 取代了 RH 炉中上

升管和下降管的作用, 在脱气过程中使真空室内的钢液不断更新。

(2) 对于原吹氩位置(距中心 0.424 m), 大部分氩气没有进入浸渍管, 而是从钢包自由液面逸出, 降低了氩气对钢液的搅拌效果, 影响脱气脱碳效率。为避免气体逸出, 吹气孔距圆心距离应在 0.3 m 范围内。

(3) 通过计算吹气位置对混匀时间的影响, 得出当吹气孔位置距圆心距离大于 0.2 m 时, 混匀时间随着距离增加而减小, 尤其是吹气孔距圆心大于 0.3 m 时, 混匀时间减小更为明显。

(4) 随着吹气孔向钢包底部中心移动, 钢液对浸渍管的冲刷减弱, 钢液循环流量逐渐增大。

(5) 综合考虑钢液的脱气效果和浸渍管耐火材料的使用寿命, 最佳的吹气范围应选在距钢包底部中心 0.25 ~ 0.3 m 处。

### 参考文献

- 1 Kitamura Shin-ya, Aoki Hiroyuki, Miyamoto Ken-ichiro. Development of a Novel Degassing Process Consisting with Single Large Immersion Snorkel and a Bottom Bubbling Ladle[J]. ISIJ International, 2000, 40 (5): 455-459.
- 2 朱苗勇, 沙 骏, 黄 宗. RH 真空精炼装置内钢液流动行为的数值模拟[J]. 金属学报, 2000, 36(11): 1175-1178.
- 3 魏季和, 胡汉涛. 真空循环精炼过程中钢液流动的数学模拟-流动的数学模型[J]. 过程工程学报, 2006, 6(s1): 62-65.
- 4 Ajmani Satish Kumar, Dash Sukanta K, Chandra Sanjay. Mixing Evaluation in the RH Process Using Mathematical Modeling[J]. ISIJ International, 2004, 44(1): 82-90.
- 5 樊世川, 李宝宽, 赫冀成. 多管真空循环脱气系统循环流动模型[J]. 金属学报, 2001, 37(10): 1100-1106.
- 6 耿佃桥, 雷 洪, 赫冀成. 不同浸渍管参数下 RH 装置内钢液流动行为[J]. 钢铁, 2008, 43(2): 35-40.

张利君(1981-), 女, 硕士, 冶金过程仿真模型计算。

E-mail: Zhanglijun@mail.shougang.com.cn

收稿日期: 2012-05-28