

## 单嘴精炼炉合金料加入方式及混匀特性水模型研究

秦 哲 朱梅婷 成国光 张 鉴  
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘 要** 根据相似理论,以80 t单嘴精炼炉1:4的水模型模拟,研究了单嘴精炼炉加合金料位置、吹气流量(2~10 L/min)、单嘴内液面高度(18.5~67.0 cm)、浸入深度(75~150 mm)、吹气位置等对混匀时间的影响。结果表明,在单嘴气体上升区对面加料混匀时间较短;吹气流量为6 L/min、浸入深度100~125 mm、单嘴内液面高度 $\geq 52$  cm、在钢包底 $r/R=0.5$ 位置吹气有利于混匀时间的缩短。

**关键词** 单嘴精炼炉 水模型 加合金料 混匀时间

### A Study on Water Model for Alloy Adding Pattern and Mixing Characteristics of Single Snorkel Refining Furnace

Qin Zhe, Zhu Meiting, Cheng Guoguang and Zhang Jian  
(School of Metallurgy and Ecology Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Based on similarity theory, the effect of process parameters on refining mixing time has been studied including alloy adding position in Single Snorkel refining furnace, gas blowing rate (2~10 L/min), liquid level in snorkel vacuum chamber (18.5~67.0 cm), submerged depth (75~150 mm) and gas blowing position by 1:4 water model simulated for an 80 t single snorkel refining furnace. Results show that as alloy adding at the location opposite to gas ascending zone, the mixing time is shorter, and it is available to decrease the mixing time with gas blowing rate 6 L/min, submerged depth 100~125 mm, height of liquid level in snorkel  $\geq 52$  cm and blowing gas at position  $r/R=0.5$  at bottom of ladle.

**Material Index** Single Snorkel Refining Furnace, Water Model, Adding Alloy, Mixing Time

单嘴精炼炉是20世纪70年代我国自行研制的一种由RH改造而成的新型二次精炼装置<sup>[1]</sup>,它克服了小型RH热损失大、耐火材料侵蚀严重等缺点<sup>[2]</sup>。单嘴炉在保留RH原有冶金功能的同时,将其两根浸渍管改为直径较大的单嘴,增大处理时钢液的环流量,同时将RH的上升浸入管吹氩改为钢包底部偏心吹氩,以增大氩气泡上升路径,充分利用氩气的搅拌能力,提高真空脱碳、脱硫、快速合金化等精炼能力,从而降低转炉负荷和炉外精炼运行成本,适于冶炼超低碳用钢。20世纪90年代,日本八幡厂进行了形似单嘴炉的REDA炉水模型和工业生产试验<sup>[3,4]</sup>。

#### 1 实验方法

根据相似理论,以钢厂80 t单嘴精炼炉为原型,水模型实验装置的设计尺寸与实际尺寸比例为1:4,水模型钢包上口内径649 mm、下口内径551 mm、深778 mm,单嘴浸渍管内径325 mm、外径496 mm、高1200 mm。钢包底吹气位置以 $r/R$ 确定,其中 $r$ 为透气砖中心到钢包底面中心的距离、 $R$ 为单嘴内半径(图1)。实验模型确定的 $r/R$ 值分别为0.4、0.5、0.65。实验过程吹入氮气,钢包液面深度为563 mm,真空泵抽气能力240 L/min,实验过程每次

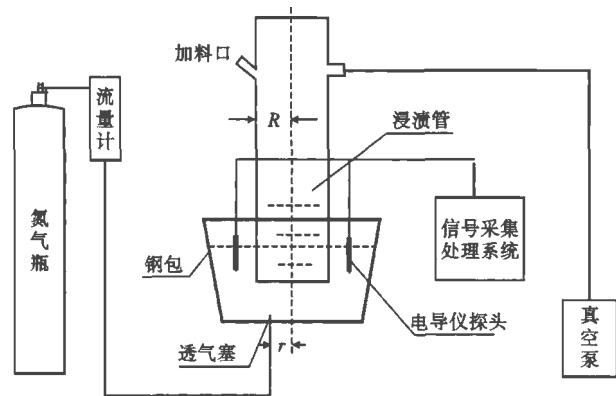


图1 实验装置和吹气位置示意图  
Fig. 1 Schematics of test device and gas blowing position

加入15 g块状KCl试剂,通过测定电导率得出混匀时间。实验过程电极探头位置示于图2(其中 $b_1 \sim b_3$ 分别为单嘴外侧吹气口上方、侧面、对面),图2中 $D_1 \sim D_3$ 分别为钢包上沿直径、浸渍管外径和浸渍管内径。

#### 2 实验结果与讨论

##### 2.1 加料方式对混匀时间的影响

图2示出水模型实验中的加料位置( $a_1$ 为钢包

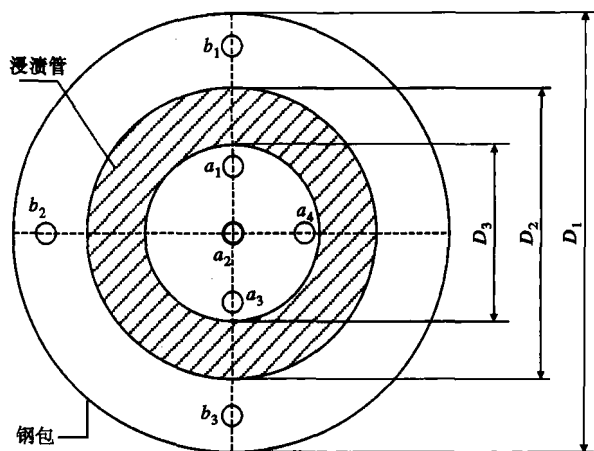


图 2 试剂加入位置( $a_1 \sim a_4$ )和电极探头位置( $b_1 \sim b_3$ )示意图  
Fig. 2 Schematics of adding reagent ( $a_1 \sim a_4$ ) and location of electrode probe ( $b_1 \sim b_3$ )

吹气口上方,  $a_2$  为浸渍管中间), 浸渍管浸入深度 100 mm, 单嘴内液面高度 37 cm, 气体流量 6 L/min, 电极探头位置液面下距单嘴底部 50 mm。

由表 1 可知, 浸渍管中间加试剂(加试剂点  $a_2$ ) 时, 混匀时间最短, 比其他位置加试剂所用的混匀时间平均降低 8.7%; 吹气口上方(加试剂点  $a_1$ ) 加试剂时混匀时间最长; 吹气口对面(加试剂点  $a_3$ ) 及与吹气口成  $90^\circ$  角位置(加试剂点  $a_4$ ) 加试剂所用的混匀时间相当。可见, 浸渍管中间位置加入试剂所用的混匀时间最短, 这与单嘴精炼炉的流场分布特性有关<sup>[5]</sup>。在实验条件下观察发现, 在浸渍管中心处基本是下降流股开始的起点, 在此位置加入的试剂随着下降流股呈放散式进入钢包, 有利于试剂浓度的快速混匀, 使得混匀时间较短。而实际生产中在气液上升流上方加合金料, 会降低上升流股的流速, 降低底吹气体对钢水的搅拌能, 降低环流量。

表 1 加料位置对混匀时间的影响/s  
Table 1 Effect of adding location on mixing time /s

加料位置	混匀时间
$a_1$	91
$a_2$	77
$a_3$	79
$a_4$	81

实验发现在吹气塞上方浸渍管外( $b_1$  探头位置)混匀时间最短, 吹气塞对面( $b_3$  探头位置)混匀时间最长, 如表 2 所示。其中  $b_1$  探头位置的混匀时间比  $b_2$  探头位置平均缩短 11%, 比  $b_3$  探头位置平均缩短 22%。在相同工况下, 浸渍管外吹气口上方位置( $b_1$  位置)的混匀时间最短, 这是由于该点位于

表 2 电极探头位置的混匀时间 /s

Table 2 Mixing time at different location of electrode probe /s

电极探头位置	混匀时间
$b_1$	74
$b_2$	82
$b_3$	90

气泡上升流股上方, 相应气液的搅动能大, 而且随着吹气流量的增大, 有气泡从浸渍管外周期性溢出现象, 也会增加该点位置的流动活跃程度。

## 2.2 吹气流量对混匀时间的影响

随着吹气流量的增加, 混匀时间呈减小趋势, 如图 3(a) 所示。吹气流量从 2 L/min 增加到 4 L/min 时, 混匀时间降低 48%, 降低幅度明显; 吹气流量从 4 L/min 增加到 6 L/min 时, 混匀时间继续降低, 但降低程度趋缓。当气体流量增大时, 气泡流中的气泡密度增大, 相应气液的搅拌动能增大; 同时, 气体的出口速率增加, 从而增加输入动能, 促进钢液的搅拌和运动, 显著缩短混匀时间。当吹气流量进一步增大, 气泡密度增加, 气泡之间的相互作用和影响凸现出来, 使每个气泡的作用效率下降; 其次, 气体流量增大时, 单个气泡相互碰撞而体积增大, 其运动阻力随之增大, 抵消了部分气体对液体的搅拌能。而且, 当气体流量很大时, 气液两相区内体积分数很大, 钢液含量较少, 由气泡直接带动的钢液量减少, 减少了钢水环流量, 从而对混匀时间的影响也就不明显了。在实验条件下, 6 L/min 的吹气流量是合理的。

## 2.3 真空度对混匀时间的影响

实验过程以浸渍管内液柱高度( $h$ ) 表征真空度, 液柱高则真空度高。由图 3(b) 可以看出, 随着真空度(浸渍管内液柱高度  $h$ ) 增加, 混匀时间先呈减少趋势, 但是随着液柱高度的继续增加, 如果吹气流量不够(4 L/min、6 L/min) 混匀时间反而略有增加, 继续增大吹气流量(8 L/min、10 L/min) 混匀时间减少。

随着浸渍管内液柱高度(真空度)的增加, 为了减少混匀时间, 吹气流量也需相应增大(图 3b)。或者说, 为了减少混匀时间, 吹气流量和浸渍管内液柱高度之间呈正相关性。这是由于随着浸渍管内液柱高度增加, 钢包内液体深度减少, 但是由于浸渍管与钢包内径的差异, 导致环流路径变长, 吹入的气体对液体的提升和搅拌能不足, 必须增大气体流量, 才能进一步增大环流量, 从而缩短混匀时间。另外, 由于浸渍管内液柱高度增加, 损失在浸渍管壁和浸渍管

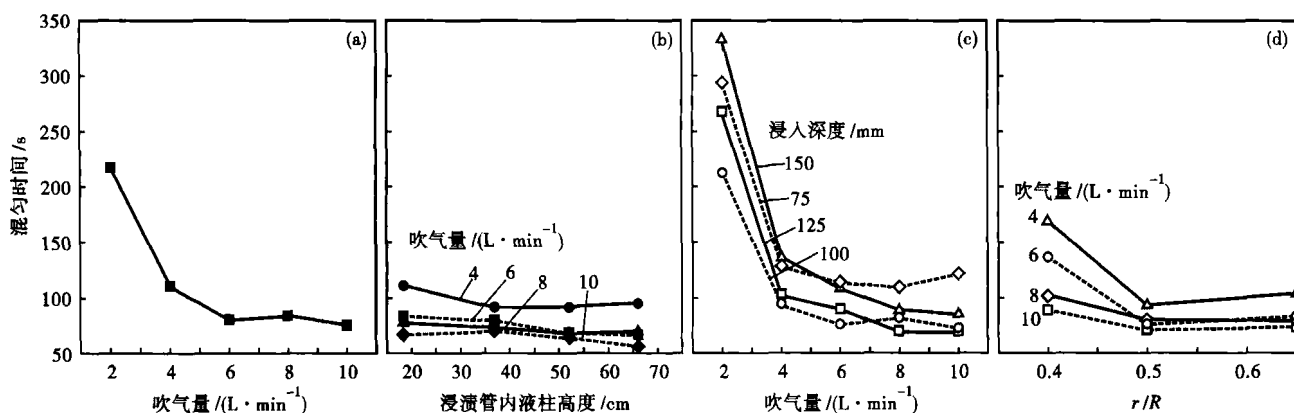


图3 吹气流量(a)、浸渍管内液柱高度(b)、浸渍管浸入深度(c)和吹气位置(d)对混匀时间的影响

Fig. 3 Effect of gas blowing rate (a), height of liquid level in snorkel (b), submerged depth of snorkel (c) and location of blowing gas (d) on mixing time

内涡流上的能量增加,这要进一步增大吹气流量才能满足增大环流强度,缩短混匀时间的目的。在实验过程观察发现,随着浸渍管内液柱变高,浸渍管下沿与钢包底部距离变小,从钢包底吹入的气体周期性外溢量减少,气体有效利用率增加,有利于混匀时间的缩短。

#### 2.4 浸渍管浸入深度对混匀时间的影响

由图3(c)可以看出,浸渍管浸入深度在100~125 mm时,相同的吹气流量条件下,混匀时间最短。而在75 mm和150 mm混匀时间都大于此值。浸渍管的浸入深度存在合理范围,过深或过浅均不利于缩短混匀时间(图3c)。这是由于浸渍管浸入过深,导致浸渍管外壁和钢包内衬之间流动缓慢区域范围增大,从而使钢液混匀变慢,当浸入深度过浅时,会导致吹入气体溢出浸渍管数量增加,降低气体对液体的提升作用,从而降低环流强度及气体的利用效率,实验中也观察到这种现象。因此,本实验条件下,浸渍管浸入深度在100~125 mm较为合理。

#### 2.5 吹气位置对混匀时间的影响

相同的吹气流量下,在 $r/R$ 为0.5时,混匀时间最短(图3d)。这是由于在0.65位置吹气时,从浸渍管外溢的气体增加,降低气体的有效利用率,从而降低环流强度,增加混匀时间。在0.4位置吹气时,由于气液上升流偏靠中心,导致上升流与下降流在浸渍管内“碰撞”,形成的涡流增加,恶化流场,能量损耗增加,降低环流强度,增加混匀时间。在0.5位置吹气时,浸渍管内可以保持较好的环流循环路径,形成良好的流场,减少涡流,从而有利于缩短混匀时间。

### 3 结论

(1) 浸渍管中间加试剂比其他位置加试剂所用

的混匀时间平均降低8.7%。

(2) 吹气流量存在合理值,在实验条件下,合理的吹气流量为6 L/min。

(3) 真空度(浸渍管内液柱高度)和吹气流量之间呈正相关性。真空度增加,浸渍管内液柱高度增加,环流路径变长,损失在浸渍管壁和浸渍管内涡流上的能量增加,为了缩短混匀时间,需要进一步增大吹气流量。

(4) 浸渍管的浸入深度存在合理范围,过深或过浅均不利于混匀时间缩短,本实验条件下浸入深度以100~125 mm为宜。

(5) 吹气位置合理,精炼炉内可以保持较好的环流循环路径,形成良好的流场,减少浸渍管内的涡流,从而有利于缩短混匀时间。本实验条件下选取 $r/R$ 等于0.5为宜。

#### 参考文献

- 1 成国光,张 鉴,杨念祖,等.单嘴精炼炉轴承钢脱氧的动力学模型.特殊钢,1994,15(5):22
- 2 赵钧良,张 鉴,杨念祖,等.单嘴精炼炉吹氧精炼的水模型研究.特殊钢,1994,15(2):22
- 3 Hiroyuki Aoki, Shin-ya Kitamura, Ken-ichiro Miyamoto. Development of New Secondary Refining Process Named REDA (Revolutionary Degassing Activator). ISS 82<sup>nd</sup> Steelmaking Conference Proceedings, 1999, 82:351
- 4 Shin-ya Kitamura, Hiroyuki Aoki, Ken-ichiro Miyamoto, et al. Development of a Novel Degassing Process Consisting With Single Large Immersion Snorkel and a Bottom Bubbling Ladle. Japan: ISIJ International, 2000, 40(5):455
- 5 王 潮,张 鉴,杨念祖,等.单嘴精炼炉流场及环流速度的水模型研究.特殊钢,1998,19(2):12

秦 哲(1977-),男,博士研究生,真空精炼、钢水洁净度及浇铸研究。

收稿日期:2009-09-15