

## 单嘴精炼炉真空处理过程气泡行为及冶金效果研究

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,以钢厂 80 t 单嘴精炼炉 1:4 的水模型模拟了单嘴精炼炉内气泡行为,分析了吹气流量 (2~10 L/min)、吹气塞直径 (15~30 mm) 对气泡行为、混匀时间的影响。水模拟结果表明,随吹气流量增加,混匀时间减少,但吹气流量  $\geq 6$  L/min,混匀时间没有显著变化;在相同吹气量下,吹气塞直径增加,混匀时间减少。实验研究基础上,在 80 t 单嘴精炼炉上进行了超低碳钢的生产试验,结果表明单嘴精炼炉在 18 min 脱碳时间内,钢中碳含量可降到  $10 \times 10^{-6}$ ;脱硫剂消耗 4 kg/t 的情况下,成品钢中 S 含量为  $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ ,脱硫率平均达 49%;吹氩强度平均为 4 L/(t·min),是相同吨位 RH 的 25%。

**关键词** 单嘴精炼炉 水模型 气泡行为 冶金效果

## A Study on Bubble Behavior during Vacuum Treatment of Refining Furnace with Single Snorkel and Metallurgical Effect

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

**Abstract** According to similarity theory, the bubble behavior in single snorkel refining furnace has simulated by using a scale 1:4 water model for an 80 t single snorkel refining furnace at steel works, and the effect of gas blowing rate (2~10 L/min) and plug diameter (15~30 mm) on bubble behavior and mixing time is analyzed. Water simulation results show that with increasing gas blowing rate the mixing time decreases, but as gas blowing rate  $\geq 6$  L/min, the mixing time has no obvious change; at equal gas blowing rate, with increasing plug diameter the mixing time decreases. Based on water model experimental study, the pilot production of ultra-low carbon steel by an 80 t single snorkel refining furnace has been carried out. Results show that within decarburization time for 18 min in single snorkel refining furnace the carbon content in steel may decrease to  $10 \times 10^{-6}$ ; at the condition of using 4 kg/t desulphurizing agent the sulphur content in finished steel is  $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$  and the average desulphurizing rate is 49%; the average argon blowing intensity is 4 L/(t·min) of a single snorkel refining furnace, it is 25% that of a RH unit with same capacity.

**Material Index** Single Snorkel Refining Furnace, Water Model, Bubble Behavior, Metallurgical Effect

单嘴精炼炉是 20 世纪 70 年代我国自行研制开发的一种由 RH 改造而成的新型的二次精炼装置<sup>[1]</sup>。单嘴精炼炉克服了 RH 设备脱碳期钢水喷溅严重、脱硫效果不好、浸渍管寿命低等缺点<sup>[2]</sup>。近些年,这种新炉型在国外也越来越受到重视,日本新日铁八幡厂也报道了形似我国单嘴精炼炉的 REDA 炉投入工业生产使用的情况<sup>[3,4]</sup>。单嘴精炼炉适于冶炼超低碳、超低硫钢、IF 钢、电工钢,还适于冶炼超纯净的轴承钢<sup>[5]</sup>、不锈钢<sup>[6]</sup>等钢种。

单嘴精炼炉在保留 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浸渍管,同时将 RH 的上升浸渍管吹氩改为钢包底部偏心吹氩,如图 1 所示。图 1 中  $r$  为透气砖中心到钢包底面中心的距离, $R$  为浸渍管内半径。这样,在增大钢液环流量的同时,增大了氩气泡上升路径,充分利用氩气的搅拌能力,提高了真空脱碳、脱硫、脱气、快速合金化等精炼能力。

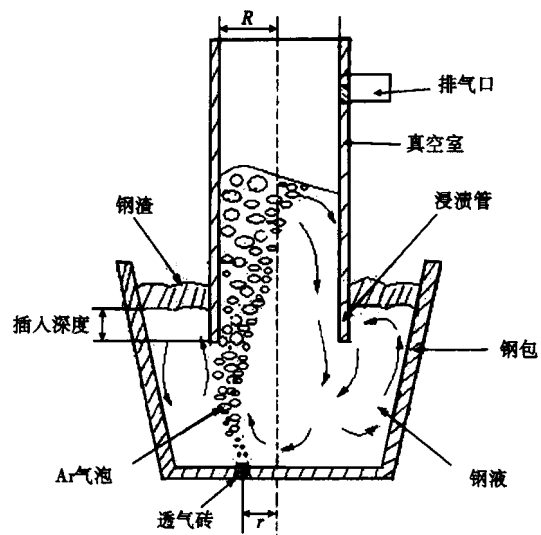


图 1 单嘴精炼炉示意图  
Fig. 1 Schematic of single snorkel refining furnace

由于单嘴精炼炉是一种新型精炼装置,对其气泡流动特征和实际冶金效果还缺乏深入的了解,本

文以相似原理为基础,实验研究了吹气流量、吹气塞直径对气泡行为及混匀时间的影响。在实验研究基础上,在钢厂 80 t 单嘴精炼炉上进行了超低碳钢的生产试验,结果表明:单嘴精炼炉在 18 min 脱碳时间内,钢中碳含量最低达  $10 \times 10^{-6}$  水平;吨钢脱硫剂消耗 4 kg/t 的情况下,  $[S]$   $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ , 平均  $24 \times 10^{-6}$ , 脱硫率平均为 49%;吹氩强度平均 4 L/(t·min), 是相同吨位 RH 的 25%;单嘴精炼炉使用寿命达 94 炉次。

### 1 研究方法

根据相似理论,以钢厂 80 t 单嘴精炼炉为原型,物理模型与原型比例为 1:4,钢包底吹气位置以  $r/R$  确定,物理模型尺寸及透气塞位置设计如表 1 所示。为消除圆形钢包内的流态因折光而引起的观察畸变,在模型钢包外套以正方体有机玻璃水箱,其内液面高度与钢包液面相平齐。

表 1 物理模型尺寸及透气塞位置

Table 1 Size of physical model and location of porous plug

钢包尺寸/mm			单嘴炉浸渍管/mm		$r/R$
上口内径	下口内径	高度	内径	外径	
649	551	778	325	496	0.5

实验装置及吹气位置如图 2 所示。实验过程从模型钢包底部吹入氮气,透气塞直径分别为 15 mm 和 30 mm,透气塞上每个透气孔径为 0.2 mm,两种直径透气塞的有效透气面积(透气孔面积之和/透气塞总面积)相同,透气塞形貌如图 3 所示,真空泵抽气能力 240 L/min。电极探头位置液面下距浸渍管底端 50 mm,通过测定电导率计算混匀时间。

### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 单嘴精炼炉真空处理过程气泡行为观察

图 3 为单嘴精炼炉真空处理过程气泡行为。由图 3 可以看出,透气塞出口处气泡群以一定的张角螺旋上升,气泡群上升过程中向外弯曲偏向离气泡群较近一侧的钢包壁。当螺旋上升的气泡群到达浸渍管底部后向管内收缩,加速进入浸渍管。进入浸渍管内的气泡群并不按原来的出口张角继续扩展,而是在入口处靠近管壁侧呈收缩趋势,在浸渍管内伴有局部

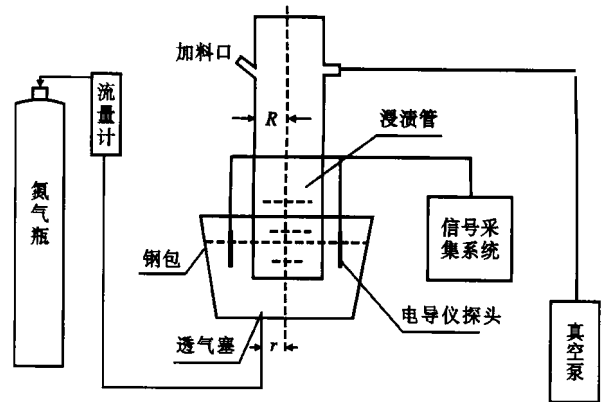


图 2 实验装置及吹气位置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental device and blowing position

“附壁”现象,图 3(a) 所示。

图 4 为单嘴精炼炉真空处理过程气泡的演变。气泡在上升过程中遵循生成→长大→破碎的规律。气泡在透气塞表面生成后脱离透气塞,位于透气塞上面 1~3 cm 处开始长大,在上升过程伴有等温膨胀和气泡间相互碰撞合并长大,图 4(a) 所示;大气泡上升过程受流股冲击扰动而破碎成较小气泡,图 4(b) 所示。到达真空室自由界面的气泡并不全部马上破裂,尤其是直径较小的气泡会随液体流股在自由界面向四周扩展,在真空室自由界面停留一定时间后破裂,图 4(c) 所示。

#### 2.2 吹气流量对气泡行为和混匀时间的影响

试验结果表明,随着吹气流量的增加,气泡出口张角增大,而且上升气泡流股弯曲偏向钢包壁幅度增大。在较小吹气流量下(2 L/min),气泡直径较小,气泡之间无碰撞合并长大和向外溢出浸渍管现

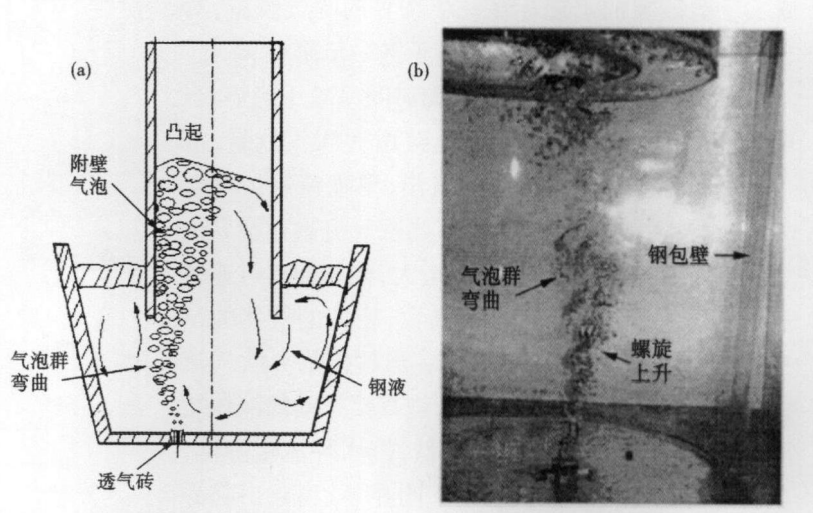


图 3 单嘴精炼炉真空处理过程气泡行为:(a)气泡群上升示意图;(b)气泡群照片  
Fig. 3 Bubble behavior during vacuum treatment in single snorkel refining furnace:  
(a) Schematic of rising bubble crowd; (b) photo of bubble crowd

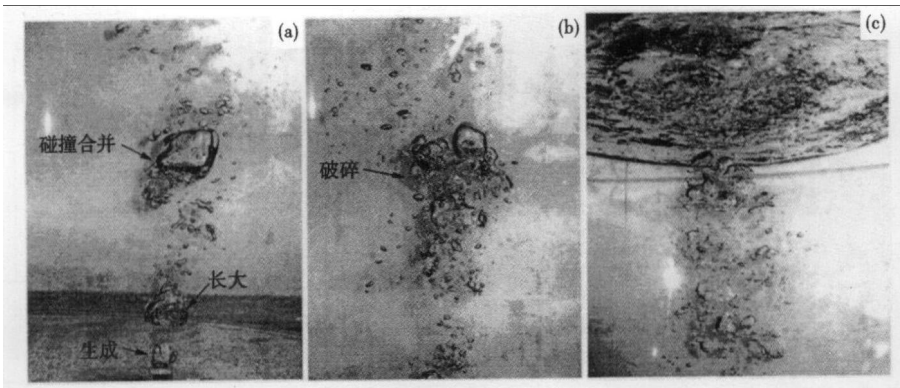


图 4 单嘴精炼炉真空处理过程气泡演变过程:(a)透气塞出口处;(b)大气泡的破碎;(c)真空室自由界面

Fig. 4 Process of bubble evolution during vacuum treatment in single snorkel refining furnace: (a) at outlet of porous plug; (b) breaking of big bubble; (c) at free interface in vacuum chamber

象,气泡群垂直上升,上升过程无螺旋现象;吹气流量增加到 6 L/min 时,气泡羽流区域扩大,气泡密度增加,气泡之间伴有少量不规则碰撞合并长大,基本无气泡溢出浸渍管现象,气泡群上升过程弯曲和螺旋现象明显,螺旋边部由小气泡组成;吹气流量增加到 10 L/min 时,气泡羽流区域进一步扩大,气泡之间伴有明显的碰撞合并长大,大气泡分布在气液羽流区的中间,在上升过程有破碎和重新生成现象,此时气泡群弯曲和螺旋程度加重,羽流区边部小气泡随螺旋周期性冲击浸渍管底部,在其上聚集而溢出浸渍管外。

由以上的分析可以看出,随着吹气流量的增加,气泡群弯向钢包内壁,这是由于钢包内的循环流股的环流速度增大,增大了对上升气泡群的冲击,致使上升气泡流股弯向钢包壁。由实验观察发现,气泡螺旋上升现象的出现存在一个临界的吹气流量,对于气泡螺旋上升的机理还有待于进一步研究。

随着吹气流量的增加,混匀时间呈减小趋势,当吹气流量增加到 6 L/min 后继续增大吹气流量,混匀时间基本没有变化。由此看出,单嘴精炼炉真空处理过程存在临界吹气流量。当吹气流量在临界流量之内时,随着吹气体流量的增大,气体的出口速率和气液羽流区中的气泡密度增大,相应的气体的搅拌能增大,显著缩短混匀时间。当超出临界吹气流量时,生成较多的大气泡,由气泡直接带动的液体量减少,气体对钢液的搅拌能降低,钢水环流量降低,从而对混匀时间的影响也就不明显了;当超出临界吹气流量时,气体在浸渍管内壁产生“附壁”效应,增加气体搅拌能在浸渍管内壁的损耗,也会造成气泡群直接对浸渍管内壁耐火材料的侵蚀。

### 2.3 吹气塞直径对气泡行为和混匀时间的影响

实验过程发现,随着透气塞直径增大(透气孔增多),在相同的吹气流量下,气泡生成的数量增加,平均直径变小;随着透气塞直径增大,生成大气泡的临界吹气流量增大,直径为 15 mm 透气塞吹气流量在 6 L/min 时就已经出现大气泡,而直径为 30 mm 透气塞吹气流量在 8 L/min 时才出现大气泡;大气泡起源于透气塞表

面,发展于透气塞上面 1~3 cm 处,在上升过程中遵循生成→长大→破碎→再生成的规律。当吹气流量增加到极限值后,此时的透气塞相当于“单孔塞”,在透气塞表面只生成一个大气泡,初生大气泡的直径达到最大值,此时初生气泡直径不再随吹气流量的增加而增大。

图 5 为吹气塞直径对混匀时间的影响。由图 5 可以看出,相同吹气流量下,吹气塞直径增加,混匀时间缩短。这是由于在较小吹气流量(4~6 L/min)下,大直径透气塞(透气孔数多)生成的气泡数量增加,气泡群羽流区增大,相应的气体对钢液的搅拌能增大,混匀时间缩短;在较大吹气流量(8~10 L/min)下,小直径透气塞(透气孔数少)生成大气泡增多,由气泡直接带动的液体量减少,气体对钢液的搅拌能降低,混匀时间增长。

### 2.4 单嘴精炼炉冶金效果

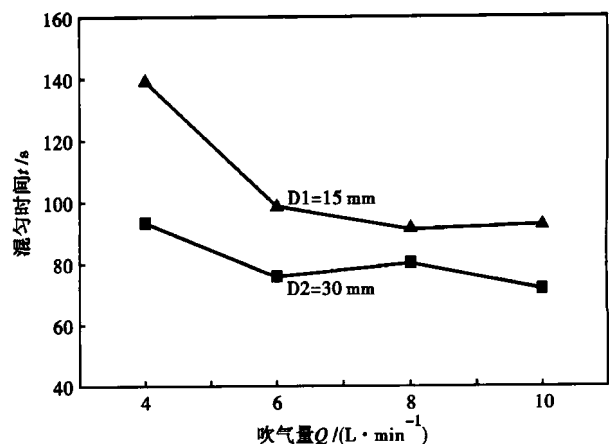


图 5 透气塞直径和吹气量对混匀时间的影响

Fig. 5 Effect of porous plug diameter and gas blowing rate on mixing time

在实验研究的基础上,在钢厂 80 t 单嘴精炼炉进行了超低碳钢生产试验,在以下几方面取得了较好的冶金效果。

#### 2.4.1 脱碳

图 6 是单嘴精炼炉脱碳速率曲线图。由图 6 可以看出,单嘴精炼炉在 18 min 脱碳时间内,可将钢水中碳含量降到  $20 \times 10^{-6}$  以下,最低达  $10 \times 10^{-6}$ 。

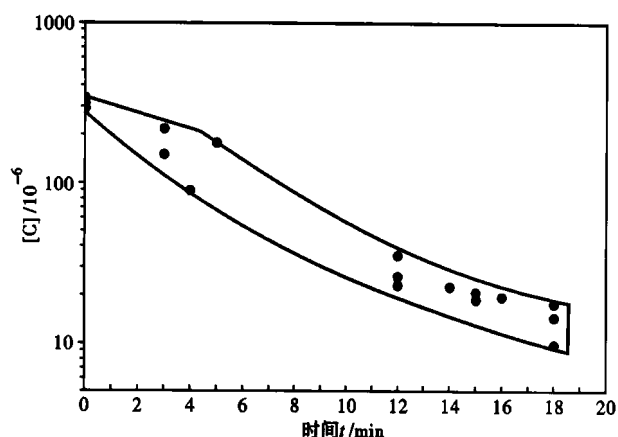


图 6 单嘴精炼炉钢水脱碳速率曲线

Fig. 6 Curve of decarburization rate of liquid in single snorkel refining furnace

#### 2.4.2 脱硫

单嘴精炼炉脱硫剂消耗平均为 4 kg/t, 处理成品钢中硫含量  $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ , 平均硫含量为  $23.7 \times 10^{-6}$ , 单嘴精炼炉脱硫率 37.5% ~ 56.9%, 平均脱硫率为 49%。

#### 2.4.3 氩气消耗

80 t 单嘴精炼炉吹氩强度为 4 L/(t·min), 吹氩流量在 100 ~ 600 L/min, 平均 320 L/min, 是相同吨位 RH 吹氩强度的 25%。单嘴精炼炉氩气消耗量远远低于 RH, 有利于降低吨钢生产成本, 减轻真空泵的抽气压力。

#### 2.4.4 使用寿命

单嘴精炼炉使用寿命达 94 炉次。单嘴精炼炉生产过程真空室内钢水喷溅程度较轻, 喷溅量少, 且喷溅位置较低, 只是相同吨位 RH 真空室喷溅高度的一半。浸渍管喷补方便, 喷补效果良好, 浸渍管外

侧耐火材料没有侵蚀, 内侧耐火材料侵蚀较均匀。真空室底部耐火砖的侵蚀状况与浸渍管的侵蚀程度相当, 真空室下部使用寿命与浸渍管使用寿命基本可以达到同步。

### 3 结论

(1) 单嘴精炼炉真空处理过程存在临界吹气流量。在临界吹气流量范围内, 随着吹气流量的增加, 混匀时间缩短, 气泡群出口张角、弯曲程度增加; 超出临界吹气流量, 生成的大气泡增多, 对混匀时间的影响不大。

(2) 随着透气塞直径增加, 混匀时间缩短, 大气泡生成的临界吹气流量增加。

(3) 单嘴精炼炉生产试验结果表明, 在 18 min 脱碳时间内, 可将钢水中碳含量降到  $20 \times 10^{-6}$  以下, 最低达  $10 \times 10^{-6}$ ; 脱硫剂消耗平均为 4 kg/t 情况下, 成品钢中硫含量为  $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ , 平均脱硫率达 49%; 吹氩强度为 4 L/(t·min), 是相同吨位 RH 吹氩强度的 25%; 单嘴精炼炉使用寿命达 94 炉次。经过进一步优化生产工艺, 单嘴精炼炉冶炼超低碳钢的冶金效果有望得到进一步提高。

#### 参考文献

- 1 大连钢厂、北京钢铁学院真空吹氩试验小组. 单咀插入式真空吹氩试验结果. 大连特殊钢, 1978(1):5
- 2 张 鉴, 成国光, 杨念祖. 单嘴精炼炉处理轴承钢的脱氧工艺. 钢铁, 1995, 30(5):19
- 3 Aoki Hiroyuki, Kitamura Shin-ya, Miyamoto Ken-ichiro. Development of New Secondary Refining Process Named REDA (Revolutionary Degassing Activator). ISS 82<sup>nd</sup> Steelmaking Conference Proceedings, 1999, 82:351
- 4 Kitamura Shin-ya, Aoki Hiroyuki, Miyamoto Ken-ichiro, 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 成国光, 张 鉴, 杨念祖. 单嘴精炼炉轴承钢脱氧的动力学模型. 特殊钢, 1994, 15(5):22
- 6 菅野浩至, 新饲昭男, 加藤胜彦. Development of New Type Vacuum Degasser (REDA)-4, CAMP-ISIJ, 1999, 12:747

秦 哲(1977-), 男, 博士研究生, 精炼、连铸研究。

收稿日期:2010-05-13

欢迎订阅 2011 年《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

全国各地邮局订阅