

## VOD 不锈钢水的初始温度对精炼效果的影响

安杰 于丹 耿振伟 贾瀚 叶强 李忠伟

(抚顺特殊钢股份有限公司第二炼钢厂, 抚顺 113001)

**摘要** 以抚钢二炼钢厂 30 t VOD 生产数据为实践依据, 分析了入炉初始钢水温度与 VOD 精炼过程铬收得率、氧利用率以及耗氧量之间的关系。结果示出, 在 VOD 吹氧冶炼条件下, 随着钢水入炉温度的升高, 有利于提高铬收得率和氧利用率, 降低耗氧量。为得到较好的精炼效果, 当不锈钢碳含量的要求分别为  $\leq 0.30\%$  C、 $\leq 0.03\%$  C 和  $\leq 0.01\%$  C 时, VOD 精炼前钢水的温度应分别为  $\geq 1600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\geq 1650\text{ }^\circ\text{C}$  和  $\geq 1670\text{ }^\circ\text{C}$ ; 为减少喷溅和溢钢事故, 钢水初始温度应  $\geq 1580\text{ }^\circ\text{C}$ , 为降低耐火材料消耗, 钢水温度应  $\leq 1720\text{ }^\circ\text{C}$ 。

**关键词** VOD 不锈钢 钢水温度 铬收得率 氧利用率 喷溅和溢钢

## Effect of Initial Temperature of Stainless Steel Liquid for VOD on Refining Efficiency

An Jie, Yu Dan, Geng Zhenwei, Jia Han, Ye Qiang and Li Zhongwei

(Second Steelmaking Plant, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** Based on production data and practice of 30 t VOD unit at the second steelmaking plant, FuSteel, the effect of initial liquid temperature on yield of chromium, oxygen utilization ratio and oxygen consumption during VOD refining process is analyzed. Results show that in condition of VOD oxygen blowing, with increasing initial liquid temperature, it is available to increase Cr yield and decrease oxygen consumption; in order to obtain better refining effect as the requirement of carbon content in stainless steel is respectively  $\leq 0.30\%$ ,  $\leq 0.03\%$  and  $\leq 0.01\%$ , the temperature of liquid before VOD refining should be respectively  $\geq 1600\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1650\text{ }^\circ\text{C}$  and  $1670\text{ }^\circ\text{C}$ ; in order to decrease accident of splashing and overflowing, the initial temperature of liquid should be  $\geq 1580\text{ }^\circ\text{C}$ , and to reduce consumption of refractory the initial temperature of liquid should be  $\leq 1720\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Material Index** VOD, Stainless Steel, Temperature of Liquid, Cr Yield, Oxygen Utilization Ratio, Splashing and Overflowing

VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 精炼能够较好的满足高铬钢水中“脱碳保铬”的要求, 具有超低碳含量冶炼能力强、金属收得率高等优势<sup>[1]</sup>。抚顺特殊钢股份有限公司第二炼钢厂的 30 t VOD (表 1) 主要用于生产各种马氏体、奥氏体以及铁素体不锈钢, 尤其以超低碳 ( $C \leq 0.03\%$ ) 不锈钢种种的精炼为代表, 同时包括部分高温合金和精钢材。

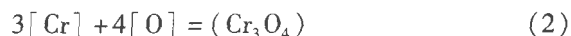
表 1 30 t VOD 的主要技术参数  
Table 1 Main parameters of 30 t VOD unit

项目	参数
容量/t	30
有效容积/ $\text{m}^3$	90
极限真空度/Pa	20
工作真空度/Pa	$\leq 100$
最大氧气流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	1 500
最大氩气流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	250
料仓数/个	8
氧枪行程/m	1.43

### 1 入炉初始钢水温度对铬收得率的影响

对于 VOD 精炼的低碳 ( $C \leq 0.30\%$ ) 或超低碳 ( $C \leq 0.03\%$ ) 不锈钢, 铬含量一般在  $10\% \sim 20\%$ 。

在 VOD 吹氧条件下, 钢水中存在碳与铬的选择性氧化现象, 其平衡关系见式(1)~(3):



脱碳保铬的平衡温度在  $1470 \sim 1529\text{ }^\circ\text{C}$ , 温度越高越有利于反应式(3)向右进行。VOD 吹氧冶炼过程, 必须保证式(1)碳能最大程度的氧化, 同时尽量减少式(2)铬的氧化。碳的氧化大多属于间接氧化, 即吹入的氧首先氧化钢水内的铬, 然后碳再被  $\text{Cr}_3\text{O}_4$  氧化, 使铬还原。所以, 式(2)钢中铬被氧化进入渣中的过程是不可避免的。

在吹氧操作结束后,需要利用硅铁、硅钙等脱氧剂还原富铬渣,其化学反应如式(4):



温度升高,硅还原  $\text{Cr}_3\text{O}_4$  的能力逐渐增强<sup>[24]</sup>。

VOD 吹氧过程碳抑制铬的氧化和吹氧后硅还原富铬渣中  $\text{Cr}_3\text{O}_4$  两个反应的“保铬”效果均与入 VOD 的钢水温度有关。100 炉 VOD 精炼的不锈钢分析,得出钢水入炉温度与铬收得率的关系见图 1。图 1 中铬收得率的计算公式为:

铬收得率 =

$$\frac{\text{精炼后钢水量} \times \text{精炼后钢水铬含量}}{\text{精炼前钢水量} \times \text{精炼前钢水铬含量} + \text{合金化加铬量}} \quad (5)$$

由图 1 可知,VOD 精炼过程的铬收得率随着入炉温度的升高而增加。VOD 吹氧冶炼过程中,碳与铬的氧化反应同时存在。当入炉温度低时,吹氧前期 C、Si 与氧的反应缓慢,而低温和充足的氧气条件,极有利于反应式(2)的进行,使得过多的铬元素氧化进入渣中。

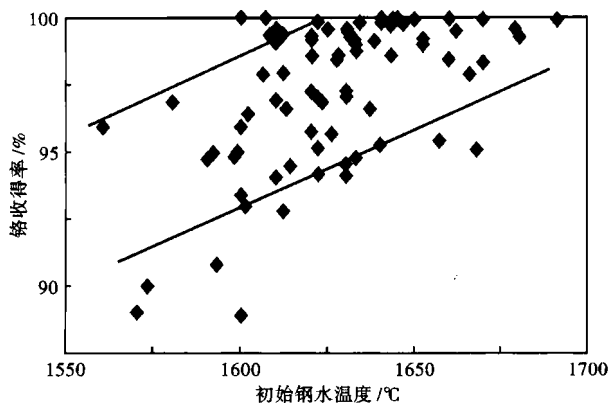


图 1 VOD 初始钢水温度对铬收得率的影响

Fig. 1 Effect of VOD initial liquid temperature on chromium yield

而对于吹氧脱碳后的还原脱气过程,脱氧剂用量大部分是通过钢水量和操作经验估算而来,缺乏精准度。入炉钢水温度低,吹氧操作铬元素大量被氧化,当脱氧剂用量不足时,易导致 VOD 精炼后的铬收得率降低,造成后期补加合金料,延长加热时间,增加冶炼成本。当  $T \geq 1600$  °C 时,VOD 吹氧和脱气冶炼后铬的收得率能够保持较高的水平(图 1)。

## 2 精炼钢水初始温度对吹氧过程氧利用率的影响

Si、Al、Ti 与氧的结合能力强,在吹氧冶炼初期优先被氧化完全,并且 Si、Al、Ti 与氧反应的氧利用

率能够稳定保持在 90% 以上。依成分来看,入炉钢水碳含量大于硅含量,利用经验公式计算出的耗氧量,一般 C 对氧气的消耗远大于 Si、Al、Ti 三个元素氧气消耗量之和。所以,可只分析 C 与氧反应的氧气利用率。VOD 吹氧冶炼过程中,钢中 C 与氧的氧化反应式为式(1)和式(6):



对 220 炉入 VOD 精炼钢水温度与吹氧过程氧利用率的数据进行统计,见图 2。

由图 2 可见,碳-氧反应的氧利用率一般在 60% ~ 75%,且随着温度升高,氧利用率上升。实践证明,VOD 精炼低碳 ( $C \leq 0.30\%$ ) 不锈钢入炉温度  $T \geq 1600$  °C;精炼超低碳 ( $C \leq 0.03\%$ ) 不锈钢,适宜的入炉温度为  $T \geq 1650$  °C;对于标准要求  $C \leq 0.01\%$  钢种的精炼,甚至需要入炉温度  $T \geq 1670$  °C,才能保证吹氧脱碳的质量和效率,同时缩短和降低后期加热的时间和钢水进碳机率。

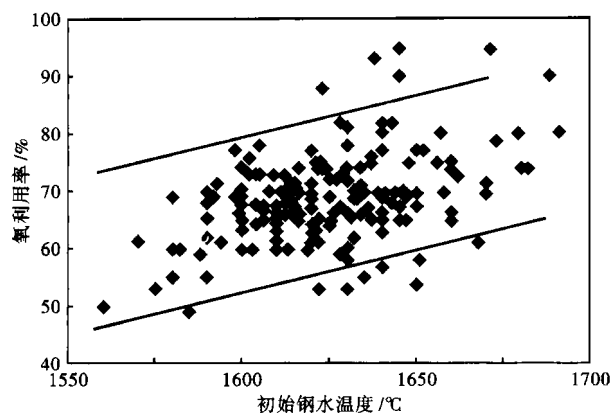


图 2 VOD 初始钢水温度对氧利用率的影响

Fig. 2 Effect of VOD initial liquid temperature on oxygen utilization ratio

提高碳与氧反应的氧利用率,能够明显降低吹氧过程的实际耗氧量。所以,入 VOD 钢水温度与耗氧量之间同样存在一定规律,见图 3。

由图 3 可知,实际耗氧量在理论耗氧量 -20% ~ +10% 之间。随着温度的升高,两者比值呈下降趋势,即实际耗氧量逐渐减少。理论耗氧量是判断吹氧冶炼终点的主要依据之一。生产中,当钢水入炉温度  $T \geq 1630$  °C 时,如若主要凭借理论耗氧量来判断吹氧终点,此时氧利用率高,很容易造成过吹现象,导致后续脱氧不良,这也是图 1 中入炉温度  $T \geq 1630$  °C 时,出现铬收得率过低点的主要原

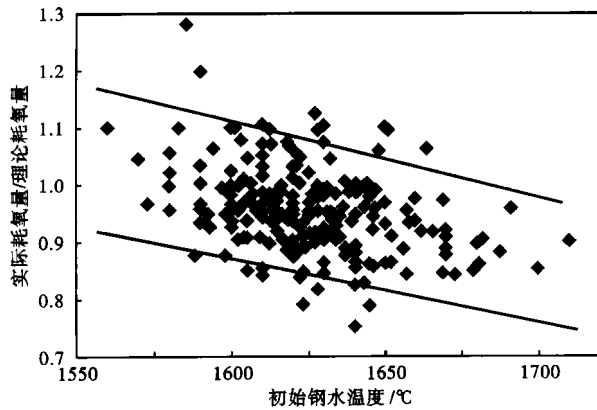


图 3 VOD 初始钢水温度对耗氧量的影响

Fig. 3 Effect of VOD initial liquid temperature on oxygen consumption

因。提高氧利用率的直接结果就是降低吹氧冶炼的实际耗氧量、缩短冶炼时间,从而提高 VOD 精炼不锈钢的冶炼效率。

### 3 入炉温度对吹氧过程喷溅的影响

依据生产经验,VOD 吹氧冶炼的理想入炉条件为:钢水碳、硅含量分别在 0.40% ~ 0.65%、0.12% ~ 0.20%, $T \geq 1620\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>。在此条件下能够最大限度的降低喷溅和溢钢事故的发生机率,同时也有利于后续的还原脱气或加热冶炼。但实际生产中,由于抚钢二炼钢所涉及的不锈钢品种繁多,工序衔接多变,导致入 VOD 精炼的钢水温度波动较大。钢水入炉温度  $T < 1620\text{ }^{\circ}\text{C}$  的现象经常发生,同样增加了喷溅和溢钢的机率。

实践发现,VOD 吹氧冶炼环境下,温度  $T \geq 1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,碳开始大量与氧反应生成 CO,同时显著抑制铬的氧化。当入炉温度  $T < 1580\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,吹氧之初炉内温度低,碳的氧化反应缓慢,此时硅的氧化反应是钢水温度升高的主要因素。随着温度的升高,逐渐加速碳的氧化反应,生成大量 CO 气泡,在真空操作和氩气搅拌的共同作用下,CO 气泡从钢水中迅速上浮逸出,带动钢水和炉渣喷溅或溢出。在碳、硅的氧化反应由缓慢向剧烈转变的过程中,钢水表面与氧接触反应强度剧烈变化且钢水内部上下温度不均,使得炉内冶炼环境恶化,最终导致喷溅和溢钢事故。所以,VOD 吹氧冶炼过程中,保持炉内反应强度的平稳极其重要。以下列举 3 炉由于温度低引起喷溅事故的入炉条件,如表 2。

当入 VOD 的钢水温度偏低,而钢水碳、硅含量较高时,加大炉内氧化反应强度的变化,延长吹氧冶炼时间等,均会提高喷溅和溢钢事故的机率。尤其

表 2 VOD 精炼时发生喷溅和溢钢事故的入炉钢水参数  
Table 2 Condition of initial liquid for VOD refining to happen splashing and overflowing

序号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	C 含量/%	Si 含量/%
1	1 566	0.83	0.41
2	1 580	0.76	0.32
3	1 589	0.77	0.28

是对于中频感应炉 + VOD 两步法冶炼不锈钢工艺,因中频感应炉冶炼过程没有电弧炉的吹氧去碳、硅操作,钢水化学成分完全由配入的炉料所决定,常使得钢水碳、硅含量高。此时,当入炉钢水温度  $T \leq 1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,喷溅和溢钢现象更为明显。依据实践,为防止喷溅和溢钢事故,VOD 精炼不锈钢钢水入炉温度不得低于  $1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述,入 VOD 精炼不锈钢的钢水温度越高越有利于提高铬收得率、氧利用率,降低耗氧量、喷溅事故的发生机率等。但是随着温度的升高,钢包耐火材料逐渐软化,VOD 冶炼过程对钢包耐火材料的机械冲刷和化学侵蚀极其严重,导致钢包寿命极低,尤其是渣线部位的寿命更低,如冶炼超低碳不锈钢使用的 Mg-Cr 砖钢包的渣线寿命仅为 4 ~ 5 次。所以,应避免钢液温度高于  $1720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 4 结论

(1) 对于低碳 ( $C \leq 0.30\%$ )、超低碳 ( $C \leq 0.03\%$ ) 以及标准要求  $C \leq 0.01\%$  的钢种,当钢水入炉温度  $T \geq 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T \geq 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$  以及  $T \geq 1670\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,能够高水平的完成 VOD 脱碳保铬的任务,保证 VOD 精炼的质量和效率。

(2) 为防止吹氧冶炼过程的喷溅和溢钢事故,应保证入 VOD 精炼钢液温度  $T \geq 1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 高温真空条件下耐火材料侵蚀严重,钢包渣线部位寿命低,须控制钢液温度  $T \leq 1720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 参考文献

- [1] 李 实,池和冰,刘 屹,等. VOD 精炼不锈钢过程中真空喷溅的预防与控制[J]. 北京科技大学学报,2011,33(增刊1):88-92.
- [2] 俞海明. 电炉钢水的炉外精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [3] 冯聚和,艾立群,刘建华. 铁水预处理与钢水炉外精炼[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [4] 邹 勇. VOD 冶炼超纯铁素体不锈钢脱碳工艺的研究[J]. 炼钢,2011,27(1):54-56.
- [5] 安 杰,耿振伟,李忠伟,等. 钢水 C、Si 含量对 VOD 精炼不锈钢喷溅的影响[J]. 特殊钢,2012,33(3):26-28.

安 杰(1985-),男,硕士,辽宁科技大学毕业,电弧炉炼钢和二次精炼工艺研究。

收稿日期:2012-07-26