

· 工艺技术 ·

## 钢水 C、Si 含量对 VOD 精炼不锈钢喷溅的影响

安杰 耿振伟 李忠伟 贾瀚 于丹  
(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 精炼不锈钢的生产数据为依据, 分析了入 VOD 精炼钢水 C (0.50% ~ 0.93%)、Si (0.18% ~ 0.42%) 含量对喷溅以及吹氧过程温度的影响, 证明 C、Si 含量高 (C ≥ 0.65%, Si ≥ 0.22%) 是导致吹氧前期喷溅事故的主要因素, 而 C、Si 含量低所引起的温升不足又影响后续冶炼的质量和效率。冶炼实践表明, 为避免喷溅事故, 当钢水 [C] ≥ 0.90% 或 [Si] ≥ 0.40% 时不得进行 VOD 精炼。在 VOD 吹氧冶炼前钢水中 C、Si 含量分别为 0.40% ~ 0.65% 和 0.12% ~ 0.20%, 能够满足 VOD 精炼不锈钢的要求。

**关键词** VOD 精炼 不锈钢 C 和 Si 含量 喷溅 钢水温度

## Effect of C, Si Content in Liquid on Splashing during VOD Process Refining Stainless Steels

An Jie, Geng Zhenwei, Li Zhongwei, Jia Han and Yu Dan  
(Second Steelmaking Plant, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** Based on production data of 30 t VOD process refining stainless steels at Second Steelmaking Plant, FuSteel, the effect of C (0.50% ~ 0.93%) and Si (0.18% ~ 0.42%) content in liquid for VOD refining on splashing and temperature of steel in oxygen blowing process has been analyzed. Results prove that the high C and Si content (≥0.65% C, ≥0.22% Si) are main factors led to splashing accident in initial period of oxygen blowing, while the low C and Si content in liquid lead to insufficiency of increased temperature of liquid and influence on quality of liquid and efficiency of later refining. The steelmaking practice shows that in order to avoid splashing accident the liquid with [C] ≥ 0.90% and [Si] ≥ 0.40% is not available to refine by VOD process, and before VOD oxygen blowing the C and Si content in liquid are respectively within 0.40% ~ 0.65% and 0.12% ~ 0.20%, it is able to meet the requirement of VOD refining stainless steels.

**Material Index** VOD Refining, Stainless Steels, C and Si Content, Splashing, Liquid Temperature

随着不锈钢需求量的不断增加, 人们对不锈钢的质量同样提出了更为严格的要求。VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 真空吹氧脱碳工艺, 是采用真空设备降低脱碳反应的 CO 分压, 从而提高脱碳效率的不锈钢二次精炼工艺<sup>[1]</sup>。由于在真空条件下很容易将钢水中的碳去除到很低的水平, 因此该精炼方法主要用于超纯、超低碳不锈钢和合金的二次精炼<sup>[2]</sup>。但 VOD 精炼过程中存在着诸多瓶颈, 其中吹氧过程造成的钢水喷溅就是冶炼工作者亟待解决的问题之一。入 VOD 钢水中 C、Si 含量过高是导致喷溅事故的主要原因, 而含量过低又会引起 VOD 吹氧过程温升不足, 对后续还原脱气乃至加热阶段产生不良影响。所以研究入 VOD 精炼前钢水中 C、Si 含量对防止喷溅事故发生, 提高冶炼质量和效率至关重要。

抚顺特殊钢股份有限公司第二炼钢厂 (以下简称抚钢二炼) 30 t

VOD 生产的钢种繁多, 主要为马氏体不锈钢、奥氏体不锈钢, 其次还有铁素体不锈钢和高温合金。抚钢二炼 VOD 基本技术参数见表 1。

依据抚钢二炼 30 t VOD 的生产实践和经验, 通过分析比较 C、Si 两种元素与氧的化学反应、对吹氧过程温度的影响以及喷溅炉次入 VOD 精炼 C、Si 的实际含量与喷溅概率的关系, 分析总结出能够避免钢水喷溅事故, 提高冶炼效率的适宜入炉钢水中 C、Si 含量。

### 1 钢水喷溅原理

抚钢二炼的不锈钢生产工艺为 EAF + LF + VOD + VHD。在实际 VOD 吹氧冶炼不锈钢过程中,

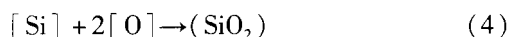
表 1 30 t VOD 装置的技术参数  
Table 1 Technical parameters of a 30 t VOD unit

容量/ t	有效容 积/m <sup>3</sup>	极限真空 度/Pa	工作真空 度/Pa	最大氧气流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	最大氩气流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	料仓 数/个	最大氧枪 行程/m
30	90	20	≤100	1 500	250	8	1.43

通讯作者: 于丹, 工程师, 抚顺特殊钢股份有限公司第二炼钢厂, 抚顺 113001

易与氧反应并具有较高放热量的元素包括C、Si、Al以及Ti,同时也是计算耗氧量的4种主要元素,但由于LF需要利用大量C粉或SiC粉等材料营造独特的还原性气氛进行冶炼,导致钢水中C、Si含量较高,而Al、Ti含量相对极低,所以VOD精炼钢水喷溅可以只考虑C、Si含量的影响。

VOD吹氧过程中C、Si与O的化学反应所释放的化学热是保证VOD精炼温升的理论依据,其化学反应如下<sup>[3]</sup>:



在VOD吹氧冶炼过程中,以上4种剧烈化学反应所造成的钢水沸腾、CO气体排除不均以及熔池上涨是产生喷溅事故的直接原因。吹氧冶炼前期分Si与O反应和C与O反应两个过程<sup>[4]</sup>。

(1)由于Si与O的亲合力大于C,脱碳反应受熔池中Si优先氧化的影响很大,Si在冶炼之初就大量氧化,导致初始脱碳速度趋近于0,而且Si与O反应的放热量远大于C,所以Si含量的高低直接影响吹氧初期炉中化学反应的剧烈程度。

(2)C剧烈氧化过程,根据反应动力学原理,高碳区( $C \geq 0.08\%$ )脱碳速度与钢中C含量无关,由供氧量大小决定。在温度与压力一定时,通过增大供氧量提高脱碳速度,而过快的脱碳速度使炉中化学反应过于剧烈,钢水表面与内部温差增大以及打乱正常的氩气搅拌模式等,炉中复杂的物理化学反应最终导致喷溅事故的发生。

## 2 钢水C、Si含量对VOD吹氧温度的影响

生产中一般要求VOD精炼钢水的入炉温度大于1620℃,但由于各工序操作不稳定的情况时有发生,以及冶炼不同品种不锈钢的化学成分偏差较大等原因,很难保证每次入VOD温度都大于1620℃,而C、Si与O的反应是VOD吹氧冶炼最主要的化学热来源,所以,吹氧前钢水中C、Si含量不应为了防止喷溅事故而过于低控,还必须保证吹氧冶炼具有足够的温升。

VOD吹氧过程要为后期还原脱气阶段创造良好的温度环境,提高冶炼质量,即必须有利于脱氧脱硫反应、熔合金料和造渣剂等。所以要求吹氧结束时钢水温度大于1660℃,且在钢包中耐火材料允

许的状态下越高越好,从而进一步降低和减少后续加热工艺的能耗和时间,提高冶炼效率。

以上说明,VOD入炉前钢水中必须要有适宜的C、Si含量,既要避免吹氧过程中的喷溅事故又要保证吹氧冶炼后的包中钢水有足够的温升。

## 3 实际生产中C、Si含量分析

实际生产中,钢水大喷溅事故极为罕见,但小规模喷溅和溢钢事故却时有发生,且概率小于5%。以7炉发生喷溅和溢钢事故为例,分析C、Si含量对VOD精炼的影响。喷溅炉次VOD入炉钢水中C、Si的具体含量见表2。

表2 7炉次VOD吹氧过程发生喷溅事故钢水C、Si含量/%

Table 2 C and Si content in liquid occurred splashing accident during VOD oxygen blowing of 7 heats / %

炉次	C	Si
1	0.93	0.42
2	0.65	0.32
3	0.50	0.18
4	0.72	0.27
5	0.66	0.22
6	0.74	0.25
7	0.69	0.30

表2中除第3炉次因氩气流量不稳定外,其余均由于吹氧前期C、Si的氧化反应过于剧烈最终导致钢水的喷溅。发生事故的C、Si含量范围分别为0.65%~0.93%和0.22%~0.42%。这说明在此范围内入VOD吹氧冶炼钢水中的C、Si含量过高,导致吹氧前期炉内氧化反应剧烈,极易发生喷溅事故。生产中入炉钢水不同C、Si含量发生喷溅事故的概率趋势见图1。

图1(a)(b)中所示的喷溅事故均由钢水中C、Si含量过高引起,当 $C \geq 0.65\%$ 、 $Si \geq 0.22\%$ 时,随着钢水中C、Si含量的增加,喷溅事故发生概率将急剧上升。而且图1(b)中趋势线的斜率明显高于图1(a),说明Si含量对VOD吹氧初期喷溅的影响更为明显。实践同样证明,钢水中C、Si共同与氧作用导致喷溅事故,而Si含量高比C含量高更容易引起VOD喷溅事故。所以VOD精炼不锈钢时,必须严格控制入炉钢水中的C、Si含量,LF应尽量为VOD创造良好的冶炼环境。

在实际中连续VOD生产,具体控制钢水中不同C、Si含量所对应的冶炼次数统计见图2与图3所示。

虽然不锈钢的品种繁多以及化学成分的变化较大,但VOD精炼钢水中C、Si含量具有一定的规律。

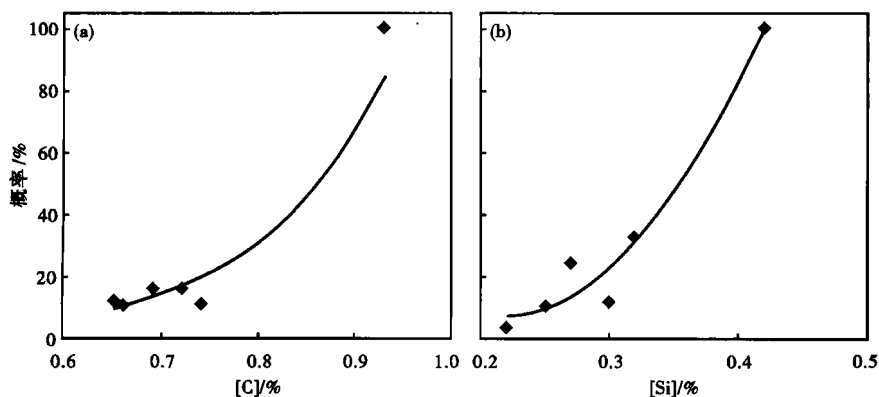


图 1 钢水 C 含量(a)和 Si 含量(b)对 VOD 精炼发生喷溅概率的影响

Fig. 1 Effect of C content (a) and Si content (b) in liquid on probability of occurred splashing during VOD refining

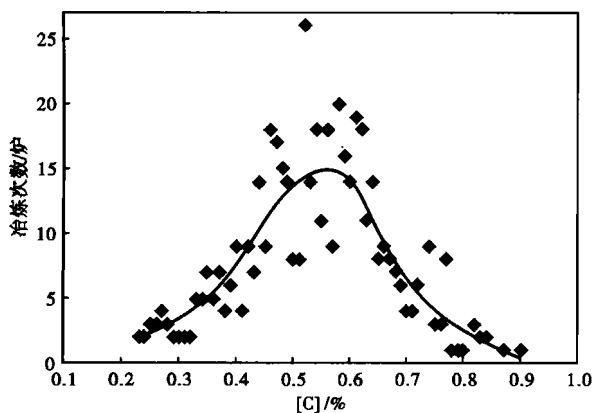


图 2 VOD 精炼前钢水中 C 含量分布

Fig. 2 Distribution of C content in liquid before VOD refining

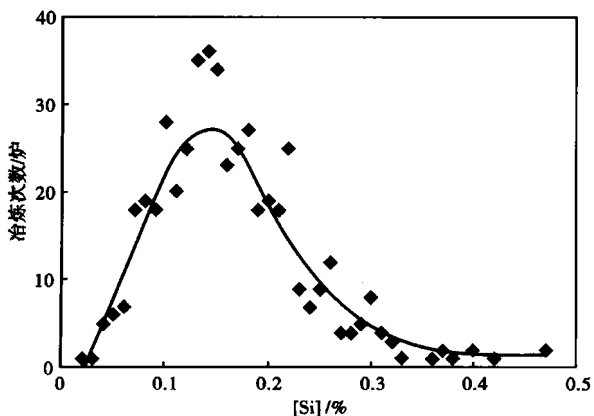


图 3 VOD 精炼前钢水中 Si 含量分布

Fig. 3 Distribution of Si content in liquid before VOD refining

由图 2 可知, VOD 精炼实际钢水 C 含量控制在 0.40% ~ 0.65%。当 C ≤ 0.40% 时, 吹氧结束温升不足, 严重影响后续冶炼工艺的效率和质量。同理, 依据图 3 所示, VOD 精炼钢水 Si 含量控制在

0.12% ~ 0.20%。

实际生产中为了避免喷溅事故, 当 C ≥ 0.90% 或 Si ≥ 0.40% 时, 不允许入 VOD 吹氧冶炼。实践证明, 当钢水中 C、Si 含量分别控制在 0.40% ~ 0.65% 和 0.12% ~ 0.20%, 基本没有出现过因吹氧前期氧化反应过于剧烈引起的喷溅事故, 又能够保证有足够的冶炼温升, 为后续操作创造良好的冶炼条件。生产中, 应根据钢水入炉温度, 在此范围内适当调整 C、Si 含量, 即入炉温度高

时, C、Si 含量应低控; 入炉温度低时, 在不造成喷溅的范围内, C、Si 含量可以适当高控。值得注意的是, 当 C、Si 含量同时到达 0.65%、0.20% 左右时, 同样容易引发喷溅事故。

由于炼钢厂的工艺路线、冶炼条件等各不相同, 要求操作人员根据本厂实际情况, 总结经验, 找到适合本厂 VOD 精炼的最佳钢水中 C、Si 含量。

#### 4 结论

(1) C、Si 与 O 的化学反应过于剧烈是造成 VOD 精炼钢水喷溅事故的主要原因。当钢水中 C ≥ 0.65%、Si ≥ 0.22% 时, 随着 C、Si 含量的增加, 喷溅事故发生概率将急剧上升。

(2) C、Si 含量较低, 会导致吹氧结束温升不足, 从而降低还原脱气阶段的冶炼效果, 进一步影响后续加热工序的冶炼时间和质量。

(3) 实际生产中, 入 VOD 吹氧冶炼的钢水中 C、Si 含量分别为 0.40% ~ 0.65% 和 0.12% ~ 0.20%。在此范围内, 根据入 VOD 的钢水温度对 C、Si 含量进行适当调整, 防止 C、Si 含量同时达到允许范围的上限。

#### 参考文献

- 1 俞海明. 电炉钢水的炉外精炼技术. 北京: 冶金工业出版社, 2010
- 2 冯聚和, 艾立群, 刘建华. 铁水预处理与钢水炉外精炼. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- 3 黄希祐. 钢铁冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 2007
- 4 雷亚, 杨治立, 任正德, 等. 炼钢学. 北京: 冶金工业出版社, 2010

安杰(1985-), 男, 硕士研究生, 辽宁科技大学毕业, 钢铁冶金专业, 短流程炼钢工艺研究。

收稿日期: 2011-11-16