

• 工艺技术 •

### 30 t VOD 精炼含氮不锈钢底吹氮气合金化的生产实践

安杰<sup>1,2</sup> 赵越<sup>2</sup> 李忠伟<sup>2</sup> 魏仁杰<sup>1</sup>

(抚顺特殊钢股份有限公司 1 技术处; 2 第二炼钢厂, 抚顺 113001)

**摘要** 依据 30 t VOD 生产数据, 在初始 [C] 0.50% ~ 0.60%, 初始 [Si] 0.12% ~ 0.20%, 初始钢水温度 1 640 ~ 1 650 °C, 氩和氮气压分别为  $0.8 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$  Pa 和  $1.5 \times 10^6 \sim 1.6 \times 10^6$  Pa 的条件下, 对比底吹氩气和底吹氮气两种工艺在入 VOD 初始、吹氧脱碳以及还原脱气后的不锈钢 (0.04% ~ 0.06% N) 中氮含量。结果表明, VOD 底吹氮气精炼后 Cr13 型和 Cr17 型两类不锈钢的钢液氮含量为  $260 \times 10^{-6}$  和  $300 \times 10^{-6}$ , 其氮合金化效果显著; 常压下氮气搅拌 Cr13 型和 Cr17 型不锈钢钢液的平均增氮速率为  $40 \times 10^{-6}/\text{min}$  和  $45 \times 10^{-6}/\text{min}$ ; 钢液温度升高, 增氮速率增加, 通过降低 VOD 精炼不锈钢的钢液氧含量, 能够提高底吹氮气的氮合金化效果。

**关键词** VOD 精炼 不锈钢 氩气 氮气 合金化

### Production Practice on Bottom Blowing Nitrogen Alloying during 30 t VOD Refining Process

An Jie<sup>1,2</sup>, Zhao Yue<sup>2</sup>, Li Zhongwei<sup>2</sup> and Wei Renjie<sup>1</sup>

(1 Technology Department, 2 Second Steelmaking Plant, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** According to 30 t VOD production data with the conditions of beginning [C] 0.50% ~ 0.60% and [Si] 0.12% ~ 0.20%, beginning liquid temperature 1 640 ~ 1 650 °C, and argon and nitrogen pressure respectively being  $0.8 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$  Pa and  $1.5 \times 10^6 \sim 1.6 \times 10^6$  Pa, the nitrogen content in stainless steels (0.04% ~ 0.06% N) at VOD beginning, decarburized by oxygen blown and after reduction and degassing by bottom blowing argon process and bottom blowing nitrogen process have been compared. Results show that after VOD bottom blowing argon refining the nitrogen content in Cr13 type and Cr17 type stainless liquid is respectively  $260 \times 10^{-6}$  and  $300 \times 10^{-6}$ , its nitrogen alloying effect is obvious, and in normal atmosphere with nitrogen stirring the average increasing rate of nitrogen in Cr13 type and 17Cr type stainless steel liquid is respectively  $40 \times 10^{-6}/\text{min}$  and  $45 \times 10^{-6}/\text{min}$ , and with increasing liquid temperature the increasing rate of nitrogen in liquid increases, and with decreasing oxygen content in VOD refining stainless steel liquid the nitrogen alloying effect by bottom blowing nitrogen could be increased.

**Material Index** VOD Refining, Stainless Steel, Argon, Nitrogen, Alloying

传统钢液氮的合金化一般是通过脱气精炼后加入氮化合金来实现的, 其价格昂贵又对钢液造成二次污染<sup>[1]</sup>。氮气是制作氧气的副产物, 以往对于多余的氮气均直接排空处理, 造成了极大的资源浪费。当下钢铁企业对生产成本和钢材质量要求不断严格, 钢包底吹氮气精炼工艺逐渐被认知并扩大使用<sup>[2-3]</sup>。底吹氮气工艺的优点在于 (1) 以价格低廉的制氧副产物代替氩气精炼, 同时可以减少氮化合金使用量, 降低冶炼成本; (2) 氮气是理想的氮合金化材料, 底吹氮气较之加入氮化合金, 避免污染钢

液, 提高钢液的纯净度。抚钢 30 t VOD 采用底吹氮气的方式精炼含氮马氏体和奥氏体不锈钢, 且工艺已趋于成熟。抚钢二炼钢将含氮不锈钢按铬元素的含量分类, 例如 Cr13 型 (1Cr13、2Cr13 等)、Cr17 型 (1Cr17Ni2、06Cr19Ni10 等), 其化学成分要求见表 1。

抚钢二炼钢 30 t VOD 基本技术参数见表 2。

#### 1 VOD 底吹氮气精炼过程钢液氮含量

VOD 精炼过程分为吹氧脱碳和还原脱气两个

表 1 VOD 精炼的典型不锈钢化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of typical stainless steels by VOD refining / %

钢种	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	N
1Cr13	0.08 ~ 0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.040	≤0.60	11.50 ~ 13.50	0.040 0 ~ 0.060 0
2Cr13	0.16 ~ 0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.040	≤0.60	12.00 ~ 14.00	0.040 0 ~ 0.060 0
1Cr17Ni2	0.11 ~ 0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.030	≤0.040	1.50 ~ 2.50	16.00 ~ 18.00	0.050 0 ~ 0.080 0
06Cr19Ni10	≤0.08	≤2.00	≤1.00	≤0.030	≤0.045	8.00 ~ 11.00	18.00 ~ 20.00	0.040 0 ~ 0.060 0

表2 30 t VOD 的主要技术参数  
Table 2 Main technical parameters of 30 t VOD unit

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

阶段。首先对底吹氩气和底吹氮气两种工艺在 VOD 精炼各阶段钢中的氮含量进行比较。规范对比钢液的成分、温度、氮气以及氩气等的初始条件为:初始 0.50% ~ 0.60% C, 初始 0.12% ~ 0.20% Si, 初始温度 1 640 ~ 1 650 °C<sup>[4]</sup>; 氩气和氮气的压力分别为  $0.8 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$  Pa 和  $1.5 \times 10^6 \sim 1.6 \times 10^6$  Pa, 保证初始钢水面翻花 600 ~ 800 mm (钢水面直径 2 300 mm)。VOD 底吹氩气和底吹氮气工艺各阶段钢中氮含量见表 3。

抚钢二炼钢不锈钢冶炼工艺路线为 EAF + LF + VOD/VHD, LF 同样采用底吹氮气精炼, 致使 VOD 入炉初始氮含量存在差距。由表 3 可知, VOD 底吹氮气精炼的钢中氮含量高于氩气工艺, 其中还原脱气后的氮合金化效果显著。对于氮元素成分规格 0.015 0% ~ 0.040 0% N 的不锈钢, VOD 底吹氮气精炼工艺可直接满足氮元素的标准要求。而吹氧脱碳后底吹氮气无明显的氮合金化现象, 并且实践发现, 底吹氮气工艺增加了 VOD 精炼的脱碳难度, 所以对于一些碳含量要求严格的品种, 如 316L、0Cr17Ni4Cu4Nb 等, 为保证 VOD 精炼的脱碳保铬能力, 吹氧脱碳阶段采用底吹氩气, 仅还原脱气时将氩气切换成氮气即可。

## 2 氮气合金化与钢液脱氧

氮在钢液中的传质受表面活性元素氧的影响<sup>[5-6]</sup>, 所以, 随钢中氧浓度增加, 氮含量呈减少趋势。这在抚钢二炼钢的生产实践中得到充分证实。

表3 底吹氩气和底吹氮气精炼过程不锈钢液氮含量对比/%

Table 3 Comparison of nitrogen content in liquid of stainless steels during bottom argon process and bottom nitrogen process / %

工艺过程	底吹氩气		底吹氮气	
	Cr13 型	Cr17 型	Cr13 型	Cr17 型
入炉初始	0.024 0	0.028 5	0.048 0	0.051 0
吹氧脱碳后	0.008 0	0.008 6	0.007 0	0.011 0
还原脱气后	0.005 0	0.007 0	0.026 0	0.030 0

钢液中氮的溶解与生产钢种的化学成分、氮气分压和钢液温度有关, 但对于同一品种、同一工艺, 此三者基本稳定。所以, 加强 VOD 精炼的脱氧操作, 降低钢中氧含量, 是提高 VOD 底吹氮气精炼增氮效果的合理方式, 同时提高了不锈钢的产品质量。VOD 精炼过程强化钢液脱氧措施: (1) 吹氧脱碳阶段应从提高氧利用率, 减少耗氧量, 同时准确判断吹氧终点等方面避免过吹现象, 为后续脱氧提供条件; (2) 脱氧剂使用 Al 粉(粒)、CaSi 粉以及 Si 块复合脱氧, 同时依据所精炼钢种的化学成分和氧含量要求进行适当调整<sup>[7]</sup>。

## 3 氮合金化速率

对于一些氮含量要求较高的不锈钢, VOD 底吹氮气精炼后仍不能满足标准要求, 需继续氮气搅拌钢液, 达到增氮的目的。随着氮气搅拌时间延长, 钢中的氮含量逐渐增高。

确定常压下氮气搅拌钢液的增氮速率, 对稳定钢包底吹氮气的合金化效果和指导生产操作极为重要。经过抚钢二炼钢生产数据的统计总结, 得出以下经验数据: 标定常压下, 钢包中底吹氮气压力为  $1.52 \times 10^6$  Pa, 炉内钢液面翻花 700 mm 条件下, 氮气搅拌平均的增氮速率见图 1。

由图 1 可知, 随着钢液温度升高, 底吹氮气的合金化速率呈上升趋势。

实际生产中, VOD 精炼还原脱气后钢中氮含量按  $N_{Cr13} = 0.026 0\%$ ,  $N_{Cr17} = 0.030 0\%$  计算, 继续底吹氮气的钢液增氮速率为  $0.004 0\%/min$ ,  $0.004 5\%/min$ , 然后分别吹氮 5 min, 8 min 即可满

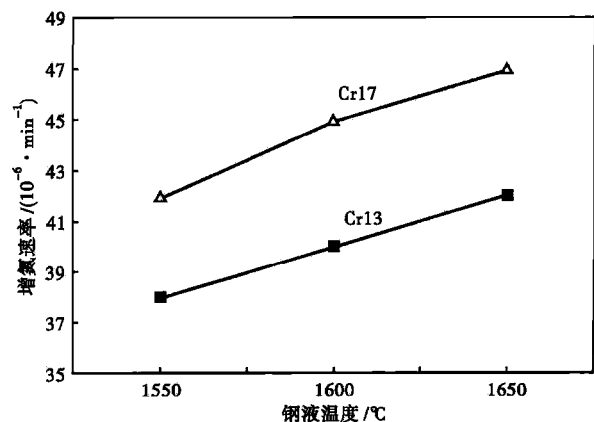


图1 钢液温度对常压下底吹氮气不锈钢液平均增氮速率的影响

Fig. 1 Effect of liquid temperature on average increasing rate of nitrogen in stainless steel liquid by bottom blowing nitrogen in normal atmosphere pressure

足标准要求。

$$N_{Cr13} = 0.0260\% + 5 \times 0.0040\% = 0.0460\%$$

(规格 0.0400% ~ 0.0600% N)

$$N_{Cr17} = 0.0300\% + 8 \times 0.0045\% = 0.0660\%$$

(规格 0.0500% ~ 0.0800% N)

$$\text{减少氮化铬用量} = \frac{(\text{底吹氮气精炼结束钢中氮含量} - \text{底吹氩气精炼脱气后氮含量}) \times \text{钢水量}}{\text{氮化铬中氮元素品位}}$$

底吹氮气与底吹氩气的经济效益对比计算过程,须考虑加入氮化铬的铬合金化效果,在底吹氮气精炼中由低碳铬铁代替,即底吹氮气的降成本额需考虑氮化铬和低碳铬铁的差价。依据抚钢二炼钢的生产实践,VOD 底吹氩气精炼脱气后 Cr13 型(1Cr13 或 2Cr13)和 Cr17 型(06Cr19Ni10 或 1Cr17Ni2)钢中的氮含量为 0.0050% 和 0.0070%,且钢水量按 31 t、氮化铬含氮量 3.1% 计算,底吹氮气比底吹氩气加入氮化铬合金化的降成本额见表 4。

表 4 底吹氮气氮合金化的经济效益

Table 4 Economic benefit of nitrogen alloying by bottom blowing nitrogen

钢种	氮/%	底吹氮气 结束氮 含量/%	减少 氮化铬量/ (kg · t <sup>-1</sup> )	降成本额/ (元 · t <sup>-1</sup> )
1Cr13 或 2Cr13	0.0400 ~ 0.0600	0.0460	13.23	100.3
06Cr19Ni10	0.0400 ~ 0.0600	0.0480	13.23	100.3
1Cr17Ni2	0.0500 ~ 0.0800	0.0660	19.03	144.3

### 5 结论

(1) VOD 底吹氮气精炼过程的钢中氮含量明显高于底吹氩气精炼,且 VOD 还原脱气后 Cr13 型、Cr17 型两类不锈钢的氮含量分别为 0.0260%、0.0300%。

### 4 VOD 底吹氮气合金化的经济效益

底吹氮气氮合金化的经济效益,是通过减少价格昂贵的氮化铬用量来实现,计算公式如下:

(2) 加强脱氧操作能够有效提高 VOD 底吹氮气精炼的增氮效果。通过正确判断吹氧终点和合理使用脱氧剂降低钢中氧含量。

(3) 钢液中氮含量随氮气搅拌时间延长而增高。标定了常压下,不同温度条件,VOD 底吹氮气精炼 Cr13 型、Cr17 型两类不锈钢的平均增氮速率为 0.0040%/min 和 0.0045%/min。随钢水温度升高,底吹氮气合金化速率上升。

### 参考文献

[1] 郭 畅,吕文俊,周立新,等. VOD 底吹氮精炼高氮钢 P91 的工艺实践[J]. 特殊钢,2011,32(3):48-50.  
 [2] 马忠存,付宪强,谢奎龙,等. 使用氮气代替氮化铬合金冶炼 P91 钢[J]. 大型铸锻件,2010,32(6):36-38.  
 [3] 时彦林,包燕平,董中奇. VOD 精炼 316L 不锈钢吹氮合金化的研究[J]. 特殊钢,2011,32(1):16-18.  
 [4] 安 杰,于 丹,耿振伟,等. VOD 不锈钢水的初始温度对精炼效果的影响[J]. 特殊钢,2013,34(1):31-33.  
 [5] 李 刚,李京社,杨树峰,等. 含氮不锈钢氮气增氮的实验及工艺[J]. 北京科技大学学报,2009,31(增刊1):84-87.  
 [6] 董廷亮,李光强. 氮在 Fe-Cr-V 液态高氮合金中的溶解行为[J]. 钢铁研究学报,2008,20(4):18-21.  
 [7] 安 杰,陈秀强,林晶晶,等. 降低 VOD/VHD 精炼不锈钢的氧含量. 第九届中国钢铁年会论文集[C]. 北京:冶金工业出版社,2013.

安 杰(1985-),男,硕士(2011 年辽宁科技大学),工程师,2008 年河北经贸大学(本科)毕业,电炉钢水的二次精炼和连铸工艺技术研究。E-mail:anjie0131@163.com

收稿日期:2015-06-25

欢迎订阅 2016 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社