

## 真空感应炉冶炼含氮不锈钢的合金增氮工艺

赵鸿燕

(太原钢铁(集团)公司技术中心,太原 030003)

**摘要** 试验研究了 200 kg 真空感应炉冶炼含氮不锈钢 Cr13(0.04%~0.06% N)、Cr23Ni19(0.22%~0.28% N)和 Cr22Ni9(0.15%~0.19% N)时,在(0.1~0.6)×10<sup>5</sup> Pa 氩气或氮气下加氮化铬(56.2% Cr、7.33% N)增氮工艺。结果表明,在氮气保护下加氮化合金,氮回收率为 80% 以上;在氩气保护下加氮化合金,氮回收率仅为 10%。提高炉内氮气压力,控制合适的加入温度,加入小粒度氮化铬,氮的回收率可达 100%。

**关键词** 真空感应炉 含氮不锈钢 氮气保护 氮化铬 氮回收率

## Adding Nitrogen Process by Alloy for Melting Nitrogenous Stainless Steels in Vacuum Induction Furnace

Zhao Hongyan

(Technology Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co, Taiyuan 030003)

**Abstract** The adding nitrogen processes by added nitrated ferrochrome (56.2% Cr, 7.33% N) with (0.1~0.6) × 10<sup>5</sup> Pa argon or nitrogen atmosphere in 200 kg vacuum induction furnace for melting nitrogenous stainless steel Cr13 (0.04%~0.06% N), Cr23Ni19 (0.22%~0.28% N) and Cr22Ni9 (0.15%~0.19% N) have been tested and studied. Results showed that with added nitride alloy in nitrogen atmosphere the yield of nitrogen was more than 80%, while with added nitride alloy in argon atmosphere the yield of nitrogen only 10%. With increasing nitrogen pressure in furnace, controlling suitable adding temperature and adding smaller size nitride ferrochrome, the yield of nitrogen was up to 100%.

**Material Index** Vacuum Induction Furnace, Nitrogenous Stainless Steel, Nitrogen Atmosphere, Nitride Ferrochrome, Yield of Nitrogen

中低氮不锈钢的氮含量在 0.4% 以下,以 0.10%~0.25% 居多。冶炼的难点之一是如何精确控制钢液中的氮含量,氮合金化可以采取气相渗氮和加氮化合金两种方式<sup>[1]</sup>。本文研究了真空感应炉在保护气氛下加氮化合金冶炼含氮钢,氮的精确控制和回收率问题。

### 1 试验设备和方法

200 kg 真空感应炉的极限真空度为 6.67 × 10<sup>-2</sup> Pa, MgO 坩埚,最高工作温度 1 800 °C, 130 kg

钢锭。含氮不锈钢化学成分见表 1。氮化铬成分(%)为: 0.02C、1.00Si、0.030P、0.03S、56.2Cr、7.33N,氮气和氩气纯度均为 99.99%。

将配比好的原料加入炉中在真空下熔化和精炼(炉内压力约 0.3 Pa),精炼末期关掉真空泵,充入氮气(或氩气)加压到试验压力,然后加入氮化铬,待氮化铬全部熔化并保持 10 min 出钢,浇注温度比熔点高 50~100 °C,在真空下浇注成 Φ160 mm × 750 mm 钢锭,浇注完毕保持压力不变到注锭凝固

表 1 试验含氮不锈钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test nitrogenous stainless steel /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	N
Cr13	≤0.025	≤0.50	0.40~0.60	≤0.015	≤0.010	12.5~13.5	4.2~4.8	0.9~1.1	0.05~0.09	0.03~0.06	0.04~0.06
Cr23-Ni19	0.05~0.08	0.30~0.60	0.80~1.50	≤0.015	≤0.008	24.6~25.5	19.0~20.0	-	-	0.35~0.55	0.22~0.28
Cr22-Ni9	0.008	0.40~0.60	1.60~1.90	≤0.018	≤0.008	22.2~23.7	9.10~9.55	3.1~3.4	-	-	0.15~0.19

(图 1),最后在钢锭上取样分析氮含量。

### 2 试验结果和讨论

#### 2.1 充气种类对钢中氮回收率的影响

对于 Cr13、Cr22-Ni9 型不锈钢,在保护气压

0.3 × 10<sup>5</sup> Pa 的氮气气氛下加入氮化合金,氮回收率达 100%,而在氩气气氛下加入氮化合金,氮平均回收率分别为 14%、0.047% (表 2)。

#### 2.2 氮保护气压对氮回收率的影响

钢液中氮的溶解过程可由下式表示<sup>[2]</sup>:

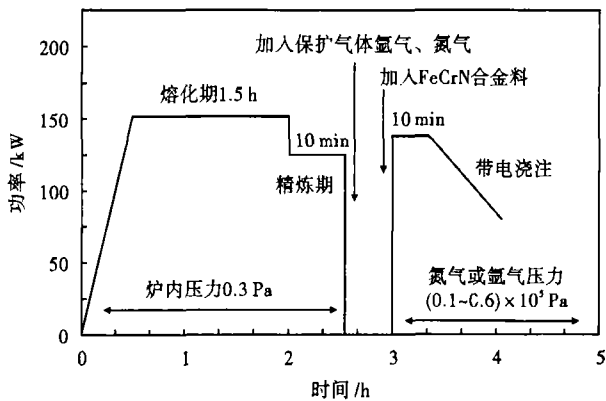


图 1 含氮不锈钢真空感应炉冶炼工艺

Fig. 1 Melting process for nitrogenous stainless steel in vacuum induction furnace

表 2 真空感应炉冶炼含氮不锈钢工艺参数和氮回收率  
Table 2 process parameters for melting nitrogenous stainless steels in vacuum induction furnace and yield of nitrogen

炉号	钢种	氮化合物加入方法	保护气体种类	压力/ 10 <sup>5</sup> Pa	氮饱和溶解度/ %	氮化合物加入量/ %	成品氮含量/ %	氮回收率/ %
ZG-1	Cr13	II	Ar	0.3	0.001	0.05	0.007	14
ZG-2	Cr13	II	N <sub>2</sub>	0.1	0.047	0.05	0.044	88
ZG-3	Cr13	II	N <sub>2</sub>	0.3	0.080	0.05	0.050	100
ZG-4	Cr23-Ni19	I	N <sub>2</sub>	0.6	0.250	0.26	0.200	80.76
ZG-5	Cr23-Ni19	II	N <sub>2</sub>	0.6	0.290	0.26	0.260	100
ZG-6	Cr22-Ni9	II	Ar	0.3	0.001	0.17	0.008	0.047
ZG-7	Cr22-Ni9	II	N <sub>2</sub>	0.1	0.130	0.17	0.110	64.7
ZG-8	Cr22-Ni9	II	N <sub>2</sub>	0.3	0.240	0.17	0.170	100
ZG-9	Cr22-Ni9	II	N <sub>2</sub>	0.5	0.280	0.17	0.170	100

注: I - 未经破碎一次加入; II - 破碎后分批加入。

$$\frac{1}{2}N_2 = [N]$$

取氮溶于钢液中浓度 1% 为标准态, 得:

$$[N] = K_N P_{N_2}^{1/2} / f_N \quad (1)$$

式中:  $K_N$ - 氮溶解反应平衡常数气压力/Pa;  $P_{N_2}$ - 氮气在大气中的分压/Pa;  $f_N$ - 氮的活度系数(无量纲);  $[N]$ - 氮在钢中溶解度。

式(1)两边取对数得:

$$\lg [N] = \lg K_N - \lg f_N + \frac{1}{2} \lg P_{N_2} \quad (2)$$

由于不锈钢中溶解了大量合金元素, 这些元素对氮的活度系数有一定影响, 氮在含氮不锈钢中溶解度计算式可由式(2)表达为如下公式<sup>[3]</sup>:

$$\lg [N] = -188T - 1.25 - [(3280/T - 0.75)(0.13\% C + 0.047\% Si + 0.01\% N - 0.01\% Mo - 0.025\% Mn - 0.045\% Cr)] + \frac{1}{2} \lg (P_{N_2}) \quad (3)$$

由式(3)可知, 气相中氮的分压越高, 氮在钢液

中的饱和溶解度就越高, 一定氮分压下氮的饱和溶解度大于加入的氮含量时, 氮能 100% 回收。如 ZG-3、ZG-5、ZG-8、ZG-9, 氮分压下氮的饱和溶解度大于加入的氮含量, 氮回收率达 100%。

图 2 为用式(3)计算得到 1 873 K 时 Cr13、奥氏体不锈钢 310HNbN、双相钢 2209 不锈钢熔体在不同氮分压下氮的饱和溶解度。

### 2.3 钢液温度及加入方法对氮回收率的影响

对奥氏体钢而言, 钢液温度低, 不利于氮化铬溶解, 影响氮的回收率。

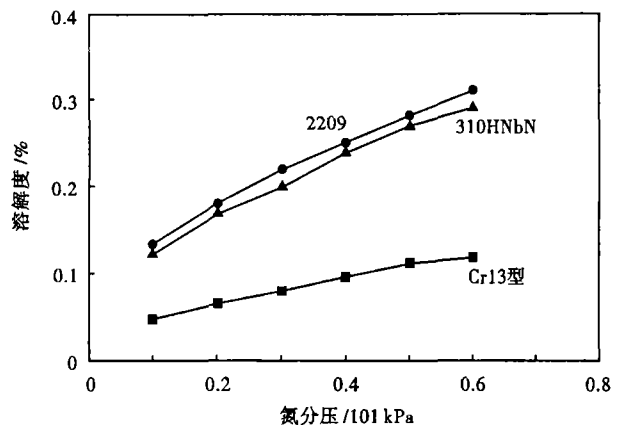


图 2 1 873 K 氮分压对含氮不锈钢氮溶解度的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen partial pressure on nitrogen solubility in nitrogenous stainless steels at 1 873 K

由表 2 可知, ZG-4 由于氮化铬一次加入量大, 未经破碎, 熔池温度急剧下降, 观察炉内, 有未熔氮化铬沾在坩埚壁上, 所以氮回收率较低。而采取方法 II 分批加入, 氮化铬全部熔化, 氮回收率提高。

### 3 结论

(1) 真空感应炉冶炼含氮钢, 在氮气保护下加入氮化合物, 氮回收率可达到 80% 以上, 而在氩气保护下加入氮化合物, 氮回收率小于 15%。

(2) 增加充氮气压力, 可提高氮饱和溶解度, 从而提高氮含量和氮回收率。饱和溶解度大于加入的氮含量, 可 100% 回收。

#### 参考文献

- 姜周华, 陈兆平, 黄宗泽. 不锈钢冶炼凝固过程氮的控制. 钢铁, 2005, 40(3): 32
- 黄希祐. 钢铁冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 1990
- 徐匡迪. 不锈钢精炼. 上海: 上海科技出版社, 1985

赵鸿燕(1970-), 女, 工程师, 1993 年包头钢铁学院毕业, 特种冶金研究。

收稿日期: 2007-06-26