

## 100 t BOF-LF-RH-CC 工艺冶炼结构钢时钢中氮的行为及控制

陆锦祥<sup>1</sup> 王忠英<sup>1</sup> 陈水盛<sup>1</sup> 薛正良<sup>2</sup> 柯超<sup>2</sup>

(1 江苏沙钢集团淮钢特钢有限公司, 淮安 223002;

2 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

**摘要** 通过对淮钢 100 t BOF-LF-RH-CC 工艺流程冶炼 45 钢和 42CrMo 钢时各工序钢水取样分析氮含量, 研究各工序对钢水中氮含量的影响。得出除吹氩和 RH 工序外, 各工序都存在增氮现象: 钢包至中间包长水口增氮占增氮总量的 40%, LF 精炼增氮占 35%, 出钢增氮占 20%。所以控制转炉终点氮含量, 控制 LF 渣层厚度, 避免 LF 精炼补加合金和增碳, 适当延长 RH 处理时间, 提高长水口氩封效果是控制钢水氮含量的关键措施。

**关键词** BOF-LF-RH-CC 工艺 结构钢 氮含量

## Behavior and Control of Nitrogen in Structural Steels Steelmaking by 100 t BOF-LF-RH-CC Process

Lu Jinxiang<sup>1</sup>, Wang Zhongying<sup>1</sup>, Chen Shuisheng<sup>1</sup>, Xue Zhengliang<sup>2</sup> and Ke Chao<sup>2</sup>

(1 Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002; 2 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** Effect of each steelmaking stage on nitrogen content in liquid 0.45C steel and 42CrMo steel is studied by analysis on nitrogen in sampling liquid steels at each stage of 100 t BOF-LF-RH-CC flow sheet at Huaigang Special Steel. It is obtained that there are nitrogen pick up at each stage except argon blowing and RH stage; the nitrogen pick up at long nozzle between ladle and tundish makes up 40% of the total nitrogen pick up value, that at LF refining stage makes up 35% and at BOF tapping stage makes up 20%. Therefore the key operation measures for control of nitrogen content in liquid steel are to control BOF end point nitrogen content in liquid, control LF slag layer thickness, avoid adding alloy and re-carburization practice in LF refining, suitably prolong RH treatment time and increase long nozzle argon sealing effect.

**Material Index** BOF-LF-RH-CC Process, Structure Steels, Nitrogen Content

江苏沙钢集团淮钢特钢用 BOF(100 t)-LF(100 t)-RH-CC(方坯和圆坯)工艺生产特殊钢。在实际生产中发现钢水中氮的含量高、波动大,且氮含量变化的规律性不明显。为了有效控制特钢产品中氮的含量,研究了氮在炼钢流程各工艺阶段中的变化规律,有效控制钢水中的氮含量。

### 1 冶炼各工序钢水氮含量变化情况

对各工序中的钢水(球拍样)和棒材进行跟踪取样,用 LECO 氧氮分析仪测定钢样氮含量。分析了包括 4 个钢种 41 个炉号的 450 多个钢样的氮含量,表 1 和表 2 给出了其中两个钢种:45 钢[(%) 0.42 ~ 0.50C、0.17 ~ 0.37Si、0.5 ~ 0.8Mn] 和 42CrMo 钢[(%) 0.38 ~ 0.45C、0.17 ~ 0.37Si、0.5 ~ 0.8Mn、0.15 ~ 0.25Mo、0.9 ~ 1.2Cr] 冶炼各工序氮含量检测数据,图 1 为 45 钢和 42CrMo 钢各工序平均氮含量变化曲线。可以看出,除两个吹氩工序和 RH 处理外,其它各工序都存在不同程度的增氮现象。

由表 3 和表 4 可知,45 钢增氮量最大的工序发

表 1 45 钢冶炼各工序氮含量变化/ $10^{-6}$

Table 1 Change of nitrogen content in liquid steel at each steelmaking stage for 0.45C steel / $10^{-6}$

序号	炉号	工位									
		转炉 终点	炉后 钢包	LF 进站	LF 化渣	LF 出站	喂丝 后	软吹 后	中间 包	棒材	
1	2201-14890	29.7	48.2	42.1	48.7	58.3	60.4	63.9	84.9	75.6	
2	1204-03746	29.4	30.2	37.1	46.2	50.6	51.9	50.0	56.0	67.2	
3	1204-03748	21.4	35.6	37.0	42.0	46.5	48.7	48.0	66.7	74.9	
4	1204-03749	25.6	42.6	43.0	46.9	49.2	50.6	46.2	69.2	69.3	
5	1204-03750	19.0	41.5	36.1	48.8	55.3	52.0	54.0	76.3	64.9	
6	1204-03751	26.8	32.5	29.2	36.2	37.9	42.8	45.2	58.6	70.8	
7	1204-03758	18.4	41.5	41.8	49.3	57.4	60.1	58.2	72.6	68.4	
8	1204-03780	32.1	31.6	29.7	35.7	40.2	41.9	41.7	52.0	45.2	
9	2301-14909	26.4	26.5	24.8	35.4	40.1	39.1	37.8	44.7	-	
10	2301-14910	42.6	43.6	52.6	52.5	57.7	55.1	55.8	65.6	-	

生在长水口(+0.001 46% N)、LF 精炼(+0.001 2% N)和转炉出钢(+0.001 03% N);42CrMo 钢增氮量最大的工序发生在长水口(+0.001 26% N)、LF 精炼(+0.001 04% N)和转炉出钢(+0.000 57% N)3 个阶段。在整个炼钢工序中,钢包至中间包之间的长水口增氮量最大(占 40% 以上)、LF 精炼增氮约占 35%、出钢增氮约占 20%。

表2 42CrMo 钢冶炼各工序氮含量变化/10<sup>-6</sup>

Table 2 Change of nitrogen content in liquid steel at each steelmaking stage for 42CrMo steel /10<sup>-6</sup>

序号	炉号	工位										
		转炉终点	炉后钢包	氩前	氩后	LF 进站	LF 化渣	LF 出站	RH 进站	RH 出站	软吹后	中间包
1	1304-03769	25.2	30.2	31.1	41.9	44.8	46.9	33.0	35.2	34.9		
2	1304-00770	31.9	34.5	29.8	42.2	48.8	50.2	31.6	31.1	37.1		
3	1304-00771	26.5	33.5	31.1	36.7	36.5	42.9	32.7	32.1	29.0		
4	1304-00772	27.9	31.6	34.9	38.6	39.9	39.8	35.5	29.9	40.4		
5	1304-00775	38.3	41.8	34.1	42.5	47.5	43.3	41.9	35.9	53.8		
6	1304-00786	25.4	41.2	22.3	25.7	33.3	35.2	29.8	31.4	-		
7	2301-19412	24.6	22.8	26.1	32.8	35.6	41.2	28.3	29.1	30.1		
8	2301-19413	20.4	24.1	26.7	30.4	44.5	40.4	28.3	33.9	57.1		
9	2301-19414	26.6	27.3	28.1	30.5	42.9	42.0	29.6	29.9	60.3		
10	2301-19415	13.9	-	19.3	23.1	22.8	22.0	27.7	27.7	53.2		
11	2301-14917	19.9	21.9	21.6	26.5	32.2	32.6	26.6	25.7	60.9		
12	2301-14918	21.1	-	25.7	26.4	27.6	34.0	33.8	32.8	51.9		
13	2301-14895	25.6	31.3	46.7	51.2	55.4	54.7	31.5	31.1	37.8		

2 转炉终点氮的控制

2.1 转炉吹炼过程中熔池氮含量变化趋势

铁水中氮含量<sup>[1]</sup>一般在0.004 0% ~ 0.006 0%。

在转炉吹炼过程中,同时存在着吸氮和脱氮过程。在碳氧反应区,钢-气界面层温度可达2 600 K 左右,氧、硫表面活性对钢液吸氮和脱氮的阻碍作用消失,钢液能通过碳氧反应生成的 CO 气泡携带脱氮<sup>[2]</sup>。

转炉吹氧脱碳过程中脱氮速度决定于脱碳速度,两者的关系存在以下经验关系式<sup>[3]</sup>:

$$-\frac{d(N)}{dt} = A_c \left( \frac{d(C)}{dt} \right)^{2/3} \times \left( \frac{f_N}{1 + 28.4(O) + 5.34(S)} \right)^2 \times \exp\left( -\frac{31\,900}{RT} \right) \times [(N)^2 - (N)_e^2] \quad (1)$$

式中: A<sub>c</sub>- 与炉型相关的常数; f<sub>N</sub>- 钢液中氮的活度系数; R- 理想气体常数[ 8. 314 J/(mol · K) ]; T- 钢液温度/K; (N)<sub>e</sub>- 平衡时钢液中氮的质量分数/%。

由公式(1)可见,氧气吹炼过程中,钢液脱氮速度与脱碳速度的2/3次方成正比。因此,在转炉冶炼中期,碳氧反应激烈,脱碳速度很大,大量的碳氧化生成 CO 将熔池中的氮带出,脱氮量 ≥ 吸氮量,脱氮

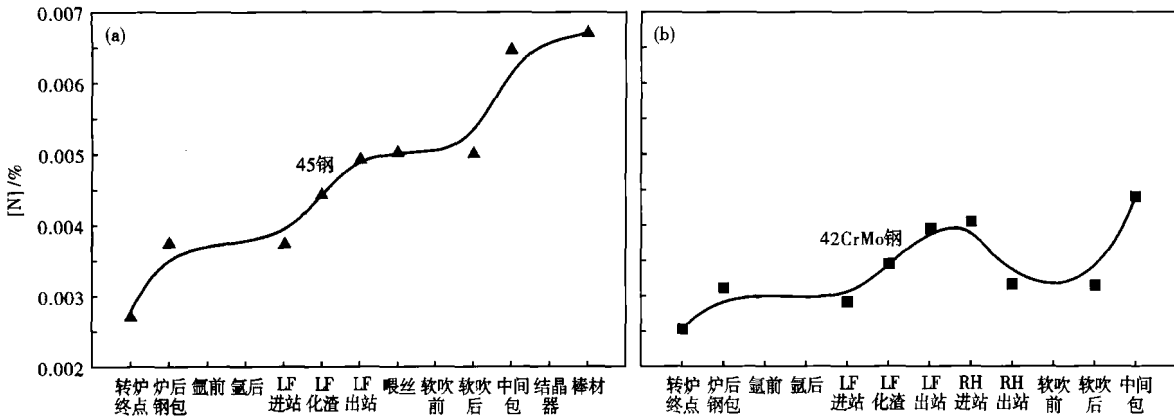


图1 各工序钢水平均氮含量变化:(a)45 钢,10 炉;(b)42CrMo 钢,13 炉

Fig.1 Change of average nitrogen content in liquid steel at each steelmaking stage: (a) 0.45C steel, 10 heats; (b) 42CrMo steel, 13 heats

表3 45 钢冶炼各工序增氮量比较/%

Table 3 Comparison of nitrogen pick up value at each steelmaking stage for 0.45C steel /%

工位	转炉终点	炉后钢包	氩前	氩后	LF				软吹前	软吹后	中间包	棒材		
					进站	化渣	出站	喂丝						
平均氮含量	0.002 71	0.003 74	-	-	0.003 73	0.004 42	0.004 93	0.005 03	-	0.005 01	0.006 47	0.006 7		
工序增氮量	出钢	0.001 03	吹氩	0	LF 精炼	0.001 2	喂丝	0.000 1	软吹	0	长水口	0.001 46	结晶器	0.000 23

表4 42CrMo 钢冶炼各工序增氮量比较/%

Table 4 Comparison of nitrogen pick up value at each steelmaking stage for 42CrMo steel /%

工位	转炉终点	炉后钢包	氩前	氩后	LF			RH		软吹前	软吹后	中间包
					进站	化渣	出站	进站	出站			
平均氮含量	0.002 52	0.003 09	-	-	0.002 9	0.003 45	0.003 94	0.004 04	0.003 16	-	0.003 13	0.004 39
工序增氮量	出钢	0.000 57	吹氩	-0.000 19	LF 精炼	0.001 04	RH	-0.000 88	软吹	0	长水口	0.001 26

速度很大。冶炼后期,由于碳氧反应减弱,脱碳速度降低,脱氮量减少,在非碳氧反应区,炼钢温度下钢液与大气中的  $N_2$  作用可以吸氮,而且钢液氮含量越低,吸氮倾向越大<sup>[4]</sup>。

## 2.2 转炉终点碳和倒炉补吹对终点氮含量的影响

图 2 可见,转炉终点氮含量随终点碳含量升高呈下降趋势,即碳拉得越低,吹炼后期脱碳速度明显下降,熔池脱氮量 $\leq$ 吸氮量,转炉终点氮就会升高。

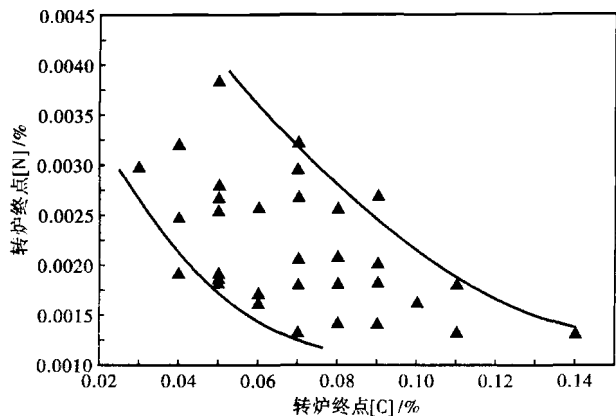


图 2 转炉钢水终点碳含量对终点氮含量的影响

Fig.2 Effect of converter end carbon content on end nitrogen content in liquid steel

倒炉补吹对转炉终点氮含量存在一定影响,因为补吹过程中钢水脱碳速度小,熔池与空气接触机会增加,对降低终点氮含量存在不利影响。因此,在冶炼低氮钢时应尽量避免补吹。

## 2.3 转炉出钢过程中氮的变化

氧是表面活性元素,大量氧原子占据了钢液自由表面,可阻碍空气中的氮气向钢液中溶解扩散。当  $[O] \geq 0.03\%$  时,可有效防止出钢增氮。因此,转炉出钢钢流与空气接触阶段不会发生增氮<sup>[2]</sup>。

转炉出钢过程钢水增氮主要发生在钢水进入钢包后,如顶渣熔化不良,覆盖不好时很容易增氮。此外,因增碳剂含氮,转炉终点碳越低,出钢增碳量越大,增氮的可能性也就越大。

## 3 精炼及连铸过程中氮的控制

### 3.1 LF 精炼过程中氮的控制

LF 操作电弧电流为 20 ~ 28 kA,而每 kA 电弧电流吹出的凹坑深度平均为 3 mm,因此电极下吹出的凹坑深度可达 60 ~ 90 mm<sup>[5]</sup>。当渣层较薄时电极下的钢液会暴露在大气中,电极下钢液温度可达 2 400 ~ 2 600 K,吸氮和增氧比较严重。经验表明,LF 精炼渣层厚度应该达到:  $L_{渣}(\text{mm}) = U_{电弧}(\text{V}) -$

(20 ~ 25),采用泡沫渣埋弧精炼可保证加热钢液时钢液面不裸露。

LF 现场补加合金是在强吹氩下进行的,钢液二次氧化率大于  $15 \times 10^{-6}/\text{min}$ 。现场大量增碳和补加合金后搅拌 5 ~ 6 min,再氧化和增氮量大。因此,提高一次合金化的准确率,以及用喂丝的方法调整 C 和其它合金成分可以明显减少二次氧化及增氮。

### 3.2 RH 精炼过程中氮的控制

图 1(b) 表明,42CrMo 钢水经 RH 真空处理具有明显的脱氮作用。在 RH 处理过程中,将真空室压力降低到极限真空度需要 10 ~ 13 min。在极限真空度下,随着保持时间延长,钢中氮含量持续下降<sup>[6]</sup>。淮钢的 RH 真空处理时间为 20 min 左右,极限真空(平均 71.7 Pa)保持时间在 6 ~ 7 min。

### 3.3 连铸过程中氮的控制

连铸过程钢水增氮主要因长水口氩封操作不当造成。淮钢目前长水口吸入的氮占流程总增氮量的 40% 以上,故须采取更为有效的氩封方式和管理机制。

## 4 结论

- (1) 转炉终点碳含量越低,终点氮含量就越高;点吹次数越多,终点氮含量相应增加。
- (2) 出钢过程中钢包内钢液面覆盖良好,是减少钢水出钢增氮的重要措施。
- (3) LF 精炼阶段避免钢液裸露和大量补加合金和增碳,可以明显减少二次氧化及增氮。
- (4) 适当延长 RH 真空处理时间,并做好长水口氩封,有利于控制钢中的氮含量。

### 参考文献

- 1 王涛,夏幸明. 预处理过程铁水中氮含量的变化. 特殊钢, 2004, 25(5): 49
- 2 傅杰. 钢冶金过程动力学. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 3 张泊汀,姚锡仁. 顶底复合吹炼中氮的行为. 钢铁, 1988, 23(12): 17
- 4 高杰超. 转炉复合吹炼钢中氮含量的变化. 辽宁冶金, 1989(1): 45
- 5 李晶,傅杰,王平,等. 轴承钢生产过程中的增氧. 特殊钢, 1998, 19(4): 39
- 6 周鉴,彭明耀,彭其春,等. 连铸 RH-MFB 精炼过程氮的行为研究. 武汉科技大学学报, 2009, 32(1): 28

陆锦祥(1950-),男,高级经济师,1986年苏州经济管理学院毕业,特殊钢生产技术管理。

收稿日期:2009-06-09