



120 t 顶底复吹转炉冶炼钢水控制氮含量的技术

曹树卫¹, 宋万平², 陈煜³

(1 江苏永钢集团有限公司, 苏州 215600; 2 江苏永钢集团有限公司技术中心, 苏州 215600;

3 中国金属学会, 北京 100081)

摘要:为控制合适的钢材氮含量,更好地满足工业线材加工性能要求,结合永钢 120 t 顶底复吹转炉→吹氩站→精炼炉→八机八流方坯连铸机及生产工艺条件进行工业试验。在低成本生产的基础上,通过调整转炉吹炼、出钢过程、精炼及连铸生产工艺,在生产操作过程中取钢样进行氮含量分析,探寻不同生产工艺、操作参数对钢液氮含量的影响,进而通过固化转炉冶炼后期氧压 0.95~1.0 MPa、压枪时间 50~70 s、保证转炉一倒率及合适的转炉终点碳含量、出钢过程钢水弱脱氧工艺、连铸机保护浇注等操作措施,实现不同钢种钢液氮含量在各工序生产过程中受控,非精炼低碳钢成品 $w[\text{O}]$ 控制在 $(110\sim 150)\times 10^{-6}$ 、 $w[\text{N}]$ 控制在 27×10^{-6} 以下,脱硫钢成品 $w[\text{N}]$ 控制在 38×10^{-6} 以下,较工艺改进前平均降低 17.8×10^{-6} ,产品质量稳定性得到较好控制。

关键词:氮含量; 转炉吹炼; 一倒率; 弱脱氧; 保护浇注

DOI:10.20057/j.1003-8620.2025-00037 **中图分类号:**TF704.6

Technology for Controlling Nitrogen Content in Molten Steel Melted by 120-ton Top-bottom Reblowing Converter

Cao Shuwei¹, Song Wanping², Chen Yu³

(1 Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Suzhou 215600, China; 2 Technology Center, Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Suzhou 215600, China; 3 The Chinese Society for Metals, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to control the appropriate nitrogen content of steel and better meet the processing performance requirements of industrial wire rods, industrial tests were carried out in combination with Yonggang's 120-ton top-bottom reblowing converter→argon blowing station→refining furnace→eight-machine eight-flow billet continuous casting machine and production process conditions. On the basis of low-cost production, by adjusting the converter blowing, steel tapping process, refining and continuous casting production process, nitrogen content samples were taken at different production operation stages for analysis and exploration of the influence of different production processes and operating parameters on the content of molten steel $[\text{N}]$, and then through solidification converter smelting later oxygen pressure 0.95 MPa-1.0 MPa, pressing gun time 50 s-70 s, ensuring the conversion furnace inversion rate and appropriate carbon content at the end of the converter, weak deoxidation process of molten steel during tapping process, continuous casting machine protection pouring and other operational measures. The content of $[\text{N}]$ in different steel grades of molten steel was controlled in each production process, and the $w[\text{O}]$ of non-refined low-carbon steel finished products is controlled within $(110\sim 150)\times 10^{-6}$, $w[\text{N}]$ is controlled within 27×10^{-6} , and the finished product $w[\text{N}]$ of desulfurization steel is controlled below 38×10^{-6} , which was an average decrease of 17.8×10^{-6} compared to before the process improvement, and the product quality stability was well controlled.

Key Words: Nitrogen Content; Converter Blowing; Success Rate of One-time Pouring; Weak Deoxidation; Protective Casting

随着钢材下游用户对质量的要求越来越高,特别是对于低碳拉丝钢、中高碳钢、帘线胎圈用钢等深加工变形量大的钢种,钢中氮元素对大多数深加工钢材产品有害,需要严格控制。氮元素在炼钢各工序生产过程中不能完全依赖工艺操作完全去除,钢液中的氮含量高时,在凝固过程中会产生偏析,由凝固的边缘析出到中心部分浓度逐渐增大,促进

了中心偏析和显微孔隙的形成^[1],钢坯内部结构会产生疏松或气孔。氮能提高铁的淬透性和高温持久强度,其次,氮化物析出硬化能提高钢的强度,但强度的增加也意味着脆性的增加,从而对钢材的加工性能产生负面影响,氮有使钢产生蓝脆、冷脆、红热脆、应变时效等^[2],氮含量较高时降低钢的冲击韧性及可焊性^[3]。例如,当钢变蓝脆时,主要是氮所

致,在工艺性能方面,当氮含量高于 16×10^{-6} 时,钢的抗氧化性变弱,冷作硬化率略高于平均值。

为降低钢铁生产过程中氮含量对最终产品的影响,冶炼过程中采用真空处理及使用低氮增碳剂、低氮合金来降低钢中氮含量,但造成生产成本的大幅增加,降低了产品的市场竞争力。为实现低成本且氮含量满足冶炼钢种质量要求,在永钢120 t顶底复吹转炉→吹氩站→精炼炉→八机八流方坯连铸机等工序开展氮含量的控制试验研究,找出不同生产工艺、技术参数对钢液氮含量的影响,提升低氮钢工艺控制能力。

1 钢中氮含量控制理论

钢液中氮的溶解度遵循西华特定律^[4],其溶解反应式如式(1)~(3)。

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

$$k_N = \frac{f_N [N] e}{P_{N_2}} \quad (2)$$

$$\lg k_N = -\frac{564}{T} - 1.095 \quad (3)$$

式中, k_N 为氮在钢液中溶解平衡常数; f_N 为钢液中氮的活度系数; $[N]e$ 为钢液平衡时氮的质量百分浓度,%; P_{N_2} 为气相中氮的分压,Pa;

$$\lg f_{[N]} = \sum_j e_N^j [%j] \quad (4)$$

式中, e_N^j 为钢液中 j 元素对氮元素的相互作用系数; $[%j]$ 为 j 元素的质量百分浓度,%。

在1873K时,钢液中不同元素对氮元素的相互作用系数^[5]见表1。

由式(1)~(4)可推算钢液平衡时氮的质量百分浓度,如式(5)。

$$w[N] = \frac{k_N}{f_N} \sqrt{P_{N_2}/P^0} \quad (5)$$

根据以上公式可知,影响钢液氮含量控制的因素有以下几点:

- 1) 钢液温度升高,氮在钢中的溶解度增加,钢水越容易吸氮;
- 2) 通过降低真空度来降低气相中氮的分压 P_{N_2} ,有利于脱除钢液氮元素;
- 3) 不同的化学元素含量对氮含量影响大,随着

C、Si等元素的增加,氮在钢中的溶解度降低趋势;而Nb、Ti元素则能够降低氮的活度系数 f_N ,增加氮在钢中溶解度。

4) 1873 K时,钢液平衡氮质量分数远高于钢液实际氮质量分数,钢液与空气直接接触极易造成增氮。

此外,1873 K时氧、硫对钢液吸氮速度常数的影响^[6]:

$$k_o = (1.7 \times 10^{-5}) / (1 + 220w[O]) \quad (6)$$

$$k_s = (1.7 \times 10^{-5}) / (1 + 130w[S]) \quad (7)$$

式中, k_o, k_s 分别为氧、硫吸附常数; $w[O], w[S]$ 分别为氧、硫的质量分数,%。

由式(6)和式(7)可以看出,降低钢液中氧、硫含量时,对应氧、硫吸附常数越大,即钢液越容易吸氮。

从冶炼开始到最终钢材产品中的氮含量由式(8)决定。

$$[N] = [N]_0 - \Delta[N]_1 + \Delta[N]_2 + \Delta[N]_3 - \Delta[N]_4 + \Delta[N]_5 \quad (8)$$

式中, $[N]$ 为钢材中的氮, $\times 10^{-6}$; $[N]_0$ 为炉料中的氮, $\times 10^{-6}$; $\Delta[N]_1$ 为转炉吹炼期间脱氮量, $\times 10^{-6}$;它是脱碳量的函数,即 $\Delta[N]_1 = f(\Delta[C])$ 。 $\Delta[N]_2$ 为出钢期间增氮量, $\times 10^{-6}$; $\Delta[N]_3$ 为LF冶炼期间增氮量, $\times 10^{-6}$; $\Delta[N]_4$ 为VD或RH真空脱气期间脱氮量, $\times 10^{-6}$; $\Delta[N]_5$ 为浇注期间钢水增氮量,包括中间包及结晶器内的增氮量, $\times 10^{-6}$ 。

由式(8)可以看出,在炼钢过程中,N可以通过许多途径进入钢液,其中钢液从气相中直接吸N是一种主要途径^[6]。因此,需要围绕转炉冶炼、出钢、精炼、连铸浇注等工序开展全流程控氮工艺研究。

2 转炉冶炼过程控制

2.1 转炉冶炼工艺对钢液氮含量的影响

(1) 试验转炉终点压枪时间

在冶炼低碳钢同一钢种牌号Q195、原正常吹炼及脱氧工艺的基础上,对比转炉终点不同压枪时间,检验分析吹氩站第一个样的氮含量,结果见表2,由表2可以看出,随着压枪时间的增加、氮含量呈先减后增趋势,压枪50~70 s之间氮含量相对较低。

2.2 转炉吹炼工艺

生产工艺及条件:120 t顶底复吹转炉氧枪枪头采用六孔双角度拉瓦尔型结构,氧枪使用氧气标准

表1 钢液中不同元素对氮元素的相互作用系数(1873 K)

Table 1 Interaction coefficients of different elements in molten steel with nitrogen (1873 K)

j	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	B	O	N
e_N^j	0.118	0.043	-0.024	0.048	0.007	0.04	-0.05	-0.098	-0.93	0.083	-0.12	0.13

表 2 钢水氮含量与转炉终点压枪工艺参数的关系

Table 2 The relationship between the nitrogen content of molten steel and the end-point pressure gun process parameters of the converter

压枪枪位/ m	氧压/ MPa	压枪氧流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	转炉压枪 时间/s	吹氩站第一个样 $w[\text{N}]/10^{-6}$
1.15~1.20	0.85	26 000±500	20~40	33.9
			50~70	27.3
			75~100	28.3

要求见表 3、底吹气体参数见表 4，吹炼工艺采用变压、变枪位操作，枪位控制基准数据见表 5。

表 3 120 t 转炉氧枪使用氧气标准

Table 3 Oxygen standard for 120 ton converter oxygen gun

氧气纯度/%	氧气总管压力/MPa	氧气工作压力 (阀后)/MPa
≥99.7	1.6~2.3	0.75~1.00

表 4 120 t 转炉底吹气体参数

Table 4 120 ton converter bottom blowing gas parameters

项目	技术参数
透气砖数/个	8
氮气纯度/%	≥99.2
总管氮源压力/MPa	≥1.0
氩气纯度/%	≥99.99
总管氩源压力/MPa	≥1.0
压缩空气气源压力/MPa	≥0.5
总管供气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	≤720
总管供气压力/MPa	≥1.0
单个透气元件气体流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	≤90, >18
设计供气强度/($\text{m}^3 \cdot (\text{t} \cdot \text{min})^{-1}$)	0.02~0.10

表 5 120 t 转炉不同高度枪位控制基准

Table 5 120-Ton converter different height gun position control benchmark

高枪位/mm	基本枪位/mm	低枪位数值/mm
1 800~2 000	1 500~1 800	1 100~1 300

备注:基准枪位 $H=(35\sim50)D$ 喉,喉口直径(D 喉) $=(38\pm 0.05)\text{mm}$ 。

120 t 转炉枪位控制主要有两种模式:(1)“高-低-低”模式;(2)“高-低-高-低”模式。前期高枪位快速化渣脱磷,中期低枪位快速脱碳,中后期预防返干适当提高枪位,终点低枪位深脱碳保证钢水低氧位。原生产吹炼过程氧气压力从开始 0.75 MPa 逐步调整到到终点压力 0.85 MPa,随着氧枪供气压力增加,氧枪氧气流量从 25 000 m^3/h 增加到 26 000 m^3/h 。

转炉吹炼期间,炉渣-金属-气体乳液的界面面积高度依赖于吹氧模式和流体流动动力学、金属液

滴的生成速率、停留时间和尺寸分布。转炉供氧导致形成大量乳化液滴 CO 气泡,CO 气泡会降低氮的分压,大的界面面积和 CO 气泡“搅拌和剥离”作用增强了脱氮反应,有较强的脱氮能力^[7],氧枪供氧与铁水中碳发生氧化反应,产生的 CO 气泡量与供氧强度、钢水碳含量高低有关,CO 气泡对钢水中氮含量相当于真空,在 CO 气泡上浮过程中脱除钢水中的氮^[8]。在转炉冶炼后期氮的吸收不可避免,供氧期间同时存在着脱氮和吸氮行为,随着碳氧反应减弱,CO 气泡量的降低,钢水中氮含量有增加趋势,为此为延缓转炉后期增氮时间节点,特别是低碳条件下需要对如何增加 CO 气泡量、阻碍空气进入钢液,乳化炉渣等进行对比研究,从而降低转炉终点氮含量。

试验方案设计思路:在原转炉终点正常吹炼氧压 0.85 MPa、固化终点压枪枪位 1.15 m 的基础上,围绕冶炼过程如何强化碳、氧反应减少吸氮调整试验工艺,不同试验方案条件下,取吹氩站钢水氮含量做氮含量检验分析,具体调整转炉冶炼后期氧压工艺与钢水氮含量关系见表 6。

表 6 调整转炉终点氧压工艺与氮含量的关系

Table 6 The relationship between adjusting the oxygen pressure process at the end of the converter and nitrogen content

工艺	试验内容	吹氩站平均 $w[\text{N}]/10^{-6}$
原方案	原工艺(氧压 0.85 MPa)	28
方案一	后期压力调低到 0.8 MPa	29
方案二	吹炼 6 min 开始氧压调高至 0.9 MPa 直到终点	21
方案三	吹炼 9 min 开始氧压调高至 0.95 MPa	20
方案四	吹炼 10 min 开始氧压调至 0.95 MPa 至结束	24

试验结果表明,方案一降低氧压促进化渣对降低氮含量没有效果,方案二与方案三在吹炼不同时间点提高氧压情况下,氮含量控制明显好于正常工艺,但方案二在吹炼最剧烈的阶段调高氧压过程存在喷溅现象,方案四与方案二、三相比延迟调整氧压氮含量高 $(3\sim 4)\times 10^{-6}$ 。试验结果对比分析发现铁水碳、供氧强度高决定 CO 气泡的生成速率,在冶炼中后期提高 CO 气泡为基础的高效复吹技术能够降低转炉终点钢水氮含量。

2.3 加入氧化铁皮材料对钢液增氮影响

转炉吹炼后期碳氧反应减弱、乳化炉渣效果变

差,理论上加入一些氧化铁皮或烧结返矿作为发泡的降温材料可阻止转炉内炉渣返干,降低进入钢水中空气量带来氮含量的增加,为此,在吹炼8~10 min期间加入100~300 kg的氧化铁皮、返矿作为化渣材料,通过生产实践发现是否加入化渣材料对降低钢水氮含量没有明显对应关系。

2.4 转炉终点碳含量

统计分析低碳钢Q195在转炉一倒条件下,转炉终点碳含量与到吹氩站钢水氮含量的对应关系如图1所示。

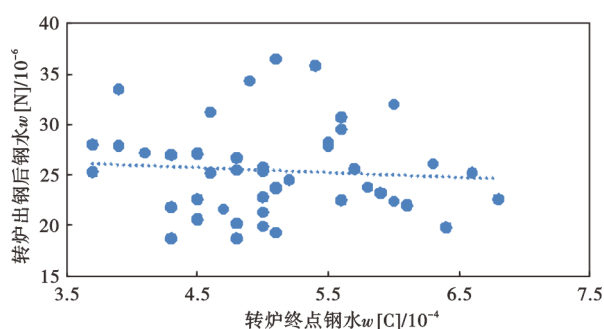


图1 转炉出钢后钢水氮含量与转炉终点碳含量的关系

Fig. 1 The relationship between the nitrogen content of molten steel and the carbon content at the end of the converter

由图1可知,随着转炉终点碳含量的增加,到吹氩站钢水氮含量有降低趋势,特别是转炉终点碳含量在0.055%~0.07%时,氮含量均比较低,说明随着转炉终点碳含量减少,碳氧反应后期减弱,钢水增氮量大于脱氮能力。

2.5 转炉倒炉次数对氮含量影响

转炉一倒是终点成分、温度同时达到目标要求后直接倒炉出钢,但转炉终点温度或成分未命中条件下,增加倒炉次数是通过重新下枪供氧吹炼以满足出钢条件的补救措施,每重新吹炼一次增加一次倒炉次数,倒炉补吹对转炉终点氮含量存在一定影响^[9]。转炉终点熔池碳含量较低,碳氧反应减弱,重新下枪供氧时氧气流冲开渣面,造成火点区钢液面裸露,吸氮速度大于CO气泡的脱氮速度,钢液在火点区从气相中吸氮造成钢中氮含量升高^[10]。

在Q195钢生产工艺一致的情况下,对一倒及补吹一次炉次在吹氩站取氮样进行分析对比,见表7,补吹一次增氮量平均增加 5.5×10^{-6} 。因此,对成品[N]含量有要求的钢种,需保证终点命中率避免补吹导致钢水增氮^[11]。

表7 钢水氮含量与倒炉次数的关系

Table 7 The relationship between the nitrogen content of molten steel and the number of reversals

倒炉次数/次	样本数/炉	$w[N]/10^{-6}$	平均值 $w[N]/10^{-6}$
1	58	17.1 ~ 33.1	25.0
2	4	25.7 ~ 35.3	30.5

3 转炉出钢工艺

3.1 出钢时间对氮含量的影响

出钢过程中高温钢水注流没有条件完全实施隔绝空气,钢水与空气接触面积大,易增加钢液氮含量。统计分析两个出钢口寿命周期内同一钢种牌号Q195氮含量变化规律,前30次与出钢口中后期取终点、吹氩站样进行光谱分析检测,随着出钢口次数增加,出钢口内径受到钢水冲刷侵蚀、内径逐渐变大,钢流截面积随内径变大而增加,出钢时间缩短,单位钢水量与空气中氮接触面积变小,对降低钢水氮含量有利,前期比中后期氮含量平均增加 1.8×10^{-6} ,具体数据见表8,说明前期出钢口内径小,细流出钢,钢液与空气接触面积大,增氮量相应较多,应尽量缩短出钢时间,出钢时间要求控制在220~360 s,当出现出钢口散流或出钢时间小于220 s时,必须对出钢口进行更换或处理^[12]。因此有效的出钢口维护非常关键,要及时清理掉出钢口外侧结冷钢,保证钢流不散乱、不细流,并在规定的时间内出完钢,可在一定程度上减少钢中的氮含量^[13],为避免或减少钢水与空气的接触,在出钢前进行钢包底吹氩气置换钢包内空气也很重要。

表8 钢水氮含量与转炉出钢时间的关系

Table 8 The relationship between nitrogen content in molten steel and converter tapping time

出钢口内径/ mm	出钢状态	平均出钢 时间/s	吹氩站钢水平均 $w[N]/10^{-6}$
180	未散流	320	26.5
		240	24.7

3.2 钢水中氧、硫元素对氮含量的影响

钢液氧含量高,氧、硫等元素就会在界面处形成一层“保护膜”,阻止空气中的氮元素溶解到钢液中^[14]。如果过早脱氧就等于破坏了“保护膜”,为此通过对比氧含量对增氮的影响,在非精炼低碳钢生产工艺上推行“两步”脱氧法,避免由于一次脱氧准确度低,造成钢水氧活度过低造成钢液增氮量大的

情况。

统计分析 120 t 转炉非精炼低碳钢 Q195 生产过程数据,在转炉冶炼及脱氧工艺一致的前提下,检验分析盘条氧、氮含量及钢水成分,对比分析钢水中氧、硫含量对氮含量的影响趋势如图 2 所示。

钢水中氮含量与氧含量的趋势,如图 2(a)所示,随着氧含量的增加,氮含量有降低趋势,因此,为降低转炉出钢过程中钢水增氮,通过试验弱脱氧剂代替强脱氧剂,脱氧合金、特别是含铝钢调铝合金加入时间延迟,强脱氧剂加入前加入预熔精炼渣以保证钢水有足够厚的熔渣层,并控制较大的钢包底吹氩流量等措施降低钢中氮含量。

成品盘条中氮含量与硫含量的关系趋势,如图 2(b)所示,在生产条件基本一致的情况下,钢水中硫含量升高,氮含量有增加趋势,有一个样明显异常,钢水 $w[S]$ 为 0.019%, $w[N]$ 高达 45.2×10^{-6} ,跟踪过程中发现本炉钢包长水口氩封压力 0.1 MPa,与正常炉次相比 0.25 MPa 相比偏低。由于转炉脱硫率有限,一般在 89% 左右,钢水硫含量与铁水硫含量有直接关系,因此,为降低钢水氮含量,对于生产拉拔较细规格的低碳钢,在不过精炼脱硫的情况下要求铁水 $w[S]$ 在 0.028% 以下。

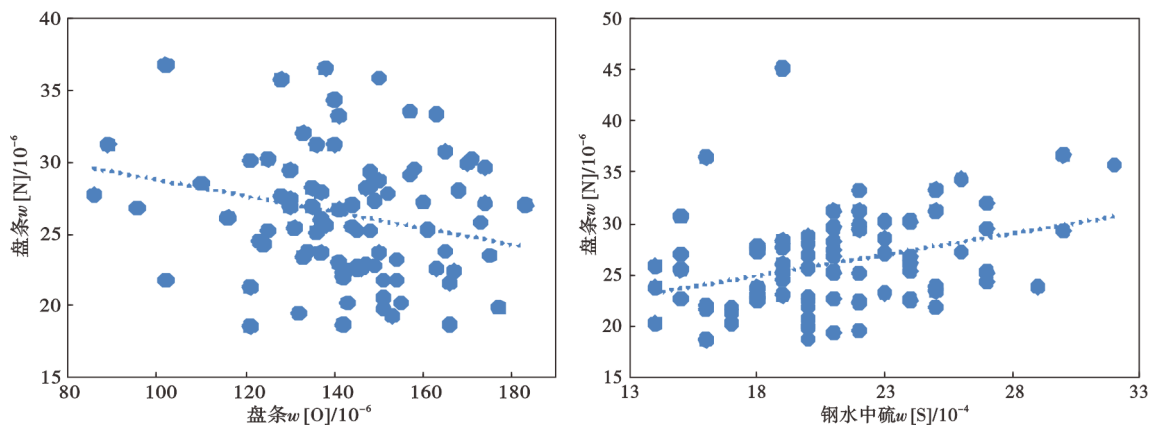


图 2 盘条氮含量与氧含量(a)和硫含量(b)关系趋势

Fig. 2 Trend of the relationship between nitrogen content and oxygen content (a) and sulfur content (b) in wire rods

表 9 转炉出钢过程加入不同渣料模式时吹氩站钢水氮含量比较

Table 9 Comparison of nitrogen content in argon station steel when different slag modes are added during converter tapping process

出钢过程 加料模式	加入量/kg	试验炉数/炉	吹氩站钢水 $w[N]/10^{-6}$			$w[N]$ 比例/%	
			平均	最高	最低	$\leq 25 \times 10^{-6}$	$\leq 30 \times 10^{-6}$
渣洗料	0	8	33.34	45.1	21.7	37.5	37.5
渣洗料	260	20	27.43	37.8	21.3	40	85
硅钡钙	200	8	26.31	35.1	22	50	87.5

3.3 转炉不同钢种出钢过程加入不同渣料及含碳物料

3.3.1 非精炼低碳钢

生产低碳钢 Q195 时采用非精炼生产工艺,对比转炉出钢过程中不加渣洗料、加入 260 kg 渣洗料、加入 200 kg 复合硅钡钙三种模式下,跟踪取样分析吹氩站钢水氮含量,渣洗料、复合硅钡钙化学成分见表 10,转炉出钢过程中三种加料模式下的吹氩站钢水氮含量对比数据见表 9。

从表 9 得出结论,加入渣洗料的炉次吹氩站钢水氮含量 $\leq 30 \times 10^{-6}$ 比例明显高于不加渣洗料的炉次,加入复合硅钡钙的炉次吹氩站钢水氮含量稳定性最好。

3.3.2 含铝钢

含铝钢氮含量未进行试验研究前,盘条氮含量控制范围在 $(55 \sim 75) \times 10^{-6}$,通过对标竞争厂家并取样分析对比,含铝钢 $w[N]$ 高于竞争厂家在 15×10^{-6} 以上,为此重点在转炉出钢过程对比加入铝酸钙促净剂(化学成分见表 10,对氮含量的影响进行试验,试验结果见表 11,从试验结果看,加入促净剂后钢水 $w[N]$ 降低 11.2×10^{-6} ,从加入各种渣料对降低氮含量的对比试验结果表明,出钢后先加入渣料对钢水隔绝空气,减少钢水增氮效果较好。

表10 渣洗料、硅钡钙与铝酸钙促净剂化学成分(质量分数)

Table 10 Chemical composition of slag washing material, silicon barium calcium and aluminum acid calcium promoter %

项目	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	BaO	CaF ₂
渣洗料	40~55	5~10	3~8	15~30	≤3	-	5~10
复合硅钡钙	25~35	≤5	-	45~55	-	15~25	-
铝酸钙促净剂	45~60	27~35	≤8	≤4	≤1	-	-

表11 吹氩站钢水氮含量与转炉出钢过程加入促净剂与不加对比

Table 11 The nitrogen content of argon blowing station steel and the addition of a purifier during the converter tapping process were compared with those without

促净剂加入量/kg	钢种牌号	冶炼炉号	吹氩站 w[N]/10 ⁻⁶	w[N]平均值/10 ⁻⁶
0	10B21	13090	36.1	33.82
		13072	24	
		13078	44.9	
	SWRCH22A	13083	33.6	
		13028	25.7	
		13033	35.4	
		13055	40.3	
	ML08Al	13056	36.5	
		13106	27.9	
		w[N]范围	24~44.9	
260	SWRCH22A	14730	22	22.62
		13783	21.3	
		13788	19.3	
		14169	23.4	
		14184	23.7	
		14190	26	
		w[N]范围及差值	19.3~26	

3.3.3 加入含碳材料

在出钢前期加入含碳材料利用碳氧反应产生一氧化碳气体,利用CO气泡真空室作用排出氮气,同时底吹氩气及产生的CO气体在出钢过程排出,减少钢水直接与空气的接触。试验出钢见钢流后加入电石30 kg或碳粉10 kg,生产实践发现,加入含碳材料与不加含碳材料炉次相比氮含量降低(0.5~1.0)×10⁻⁶,但需要根据钢种碳含量要求确定是否加入。

4 精炼过程氮含量控制

4.1 精炼过程减少增氮措施

精炼过程通过加入渣料、脱氧合金化、喂丝、电极加热及底吹氩气搅拌等手段,满足连铸机浇注钢水质量要求,精炼过程中的工艺操作有增加钢液氮含量的风险,例如:加入物料内含有氮直接进入钢

液、吹氩搅拌翻动钢液引起液面裸露、喂钙线时钢液与钙强烈反应搅拌造成特别是电极加热时,电弧温度达到3 000 °C以上,电弧区域渣层由于弧光作用被击穿,造成钢液面与空气接触,空气中的氮气极易在电弧区被电离成氮离子进入钢液^[15],未优化精炼炉生产工艺时精炼前后钢水增氮量为(8~15)×10⁻⁶。

在精炼过程中采用电石作为还原剂,以利于形成泡沫渣^[16],对精炼冶炼过程中进站、喂钙线前、离站前取氮样检验分析。从分析结果看:前期渣量、加入电石或碳化硅含碳材料,及时将炉渣处于泡沫化状态,对降低钢液氮含量效果明显。精炼炉除尘系统采用两级管道,钢包盖内一次除尘确保钢包内采用微正压操作,多余烟气通过钢包炉外围除尘罩抽走,以减少空气进入钢包炉炉盖内。精炼过程中采用微正压操作,降低氮气的分压^[17],在含铝冷镢钢精炼后期喂钙线时通过调整侧吸开口度,确保钢包炉内微正压操作,喂钙线前后取样进行分析对比,关闭精炼炉炉盖侧吸时,炉盖内微正压操作,氮含量增加值明显降低。含铝钢喂钙线前后氮含量增加值与侧吸开度的关系见表12,原来喂钙线增氮量在(5~10)×10⁻⁶,针对喂丝速度、氩气量、钢包炉内微正压进行调整,增氮量控制在5×10⁻⁶以内。试验结果表明,精炼期间采用微正压、前期送电期间泡沫化操作工艺、喂钙线速度调整为4 m/s,精炼前后钢液吸氮量能够控制在(3~8)×10⁻⁶。

4.2 钢包精炼炉底吹氩流量大小对氮含量的影响

在生产冷镢钢SWRCH22A时,精炼炉第一个样硫含量0.069%,为加速脱硫,采取提高底吹氩气强度,钢水大翻促进钢渣反应,钢包底吹氩气从正常流量9 m³/h增大到30 m³/h,钢水大翻时间10 min,钢水硫含量降低到0.011%,取钢水大翻前后样品做氮含量分析,氮含量增加9.6×10⁻⁶,具体数据见表13,说明底吹氩气流量大,与空气直接接触增氮量明显增加。

为验证精炼后期钢水弱搅拌对氮含量的影响,

表 12 含铝钢 SWRCH22A 喂钙线前后氮含量增加值与侧吸开度的关系

Table 12 The relationship between the increase in nitrogen content before and after feeding calcium wire to aluminum-containing steel SWRCH22A and the side suction opening

炉号	取样时间点	$w[\text{N}]/10^{-6}$	$w[\text{N}]$ 增加值/ 10^{-6}	侧吸开度
00853	喂钙线前	32.3	7.4	侧吸开度 30%
	喂钙线后	39.7		
00852	喂钙线前	40.6	4.1	侧吸开度 20%
	喂钙线后	44.7		
00854	喂钙线前	37.4	2.1	关闭精炼炉炉盖侧吸
	喂钙线后	39.5		

表 13 SWRCH22A 钢水强搅拌炉次氮含量的变化

Table 13 Change of secondary nitrogen content in strong stirring furnace of molten steel

炉号	氩气压力/ MPa	氩气流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	取样点	$w[\text{N}]/10^{-6}$
00322	1.25	30	强搅拌前	35.0
			强搅拌后	44.6

钢水包底吹氩气压力 1.25 MPa, 氩气流量为 1.8 m^3/h , 弱搅拌时间 8~15 min, 钢水弱搅拌前后取样分析, 氮含量存在降低或增加的情况, 从大部分炉次来看, 钢中的氮含量是微量增加的, 平均氮含量增加 0.4×10^{-6} , 说明吹氩时仍需要控制好钢水裸露面积。

5 钢水浇注过程中的氮含量控制

钢水浇注过程中氮含量增加主要来源于钢包到中间包、中间包内钢水、钢水流入结晶器与外界空气的接触。结合转炉出钢过程钢水增氮实践, 浇注过程中钢水在水口内直径小、速度快, 钢液的快速流动使得其周围的空间产生负压^[1], 钢包上下滑板、水口连接缝隙处与空气接触, 吸气情况与转炉出钢过程相比更严重。钢水浇注过程高温钢水与外界接触面积增大, 氮含量控制难度大, 钢水增氮过程必然伴随高温钢水与空气中氧发生反应产生氧化物夹杂, 对已经处理好的钢水洁净度造成更大危害, 因此浇注过程中控制氮含量的增加是防止钢水二次氧化的重点控制环节。在浇注过程中改善钢包到中间包的保护浇注方式, 采用新型石棉类垫片提高水口保护浇注的密封性, 同时, 明确钢包长水口插入深度为 200~400 mm、浸入式水口插入深度 80~120 mm。与钢水接触层采用钢种专用覆盖剂, 上层采用碳化稻壳保温, 进一步加大覆盖剂层的厚度, 浇注过程中尽量使得钢流平稳来减少钢液吸氮^[11]。

连铸浇注过程原工艺、未采取降氮措施前, 浇注过程氮含量增加值(盘条氮含量-钢水包吊至连铸

机回转台前钢水氮含量)平均为 10.18×10^{-6} , 最低 5.6×10^{-6} , 最高 17.2×10^{-6} 。通过生产实践、工艺研究改进, 浇注过程增氮可控制在 $1.5 \sim 3 \times 10^{-6}$ 。

5.1 钢水从钢包到中间包过程

钢包上下滑板间及长水口碗部采用氩封, 开浇前利用自制多孔蘑菇头氧气管吹扫、清理干净长水口碗口及水口内冷钢, 保证水口上下垂直对中钢液面, 每炉次开浇前在长水口碗口内腔放置石棉质密封垫压紧, 通过双重预防手段防止从滑板间、钢包下水口与长水口碗部缝隙处进入空气与钢液接触, 氩封氩气压力从原来 0.25 MPa 修改为 0.5 MPa, 以中间包冲击区钢水轻微蠕动为标准, 确保在钢水高速流入过程水口碗部即使存在缝隙但不会产生微负压^[12]。试验前后钢包到中间包钢水增氮量由 5×10^{-6} 左右稳定控制在 1.5×10^{-6} 以下。

5.2 中间包内钢水与外界空气的接触

中间包包盖采用刚玉料浇注成形, 四周采用钢板固定, 在钢板三个方位内接入氩气管, 钢包开浇前通入氩气密封; 同时中间包上线前包沿一周全部铺上石棉毡, 包盖与包体间双重保障做好密封。中间包烘烤结束, 中间包小车开至浇注位, 从中间包包盖的三个观察孔及冲击区插入三叉子型吹氩管吹氩, 吹入氩气置换中间包内空气。钢水包开浇后中间包钢水液面达到 400 mm 时, 中间包上方溢流槽、包盖测温孔及时加覆盖剂 300 kg 保证黑渣操作, 钢包长水口没入钢水液面下时冲击区加入覆盖剂 60 kg, 保证中包渣的隔离空气效果。根据浇注炉数及下渣量定时从溢渣槽排渣, 同时补充覆盖剂、碳化稻壳保证中间包钢液面无红渣漏出。

5.3 中间包钢水通过浸入式水口流入结晶器

中间包钢水通过浸入式水口流入结晶器的过程中, 氮的来源主要是由于中间包下水口、滑块、浸

入式水口间存在缝隙,钢水快速流动过程中在连接间隙处形成负压区,缝隙密封效果不好时造成空气进入钢水,在实际生产中,浸入式水口碗部采用石棉垫及吹氩密封(氩气压力不大于0.2 MPa)、操作工时刻观察结晶器保护渣液面,确保浸入式水口无裂纹缺陷、水口渣线部位到下口深度控制在80~120 mm,避免氩气搅动结晶器液面引起钢坯卷渣。对于低氧低硫胎圈帘线钢采用整体浸入式水口,浸入式水口碗部嵌入中间包水口座砖内,杜绝了钢水从中间包流入结晶器过程中与空气的接触,中间包到结晶器间增氮量得到很好控制,工艺试验改进后钢水自中间包流入结晶器增氮量控制在 1.5×10^{-6} 内。

6 结论

炼钢各工序氮含量增加,钢中的氧含量、夹杂物、氢含量也会随之增加,因此,氮含量的稳定控制能够直接反映炼钢厂各工序生产控制能力。对冶炼过程钢水氮含量的控制技术研究为:

1)在枪位不变的情况下,提高转炉冶炼后期氧压到0.95~1.0 MPa,转炉终点氮含量最低。

2)随着转炉终点压枪时间增加、氮含量呈先减后增趋势,压枪50~70 s之间氮含量相对最低。

3)转炉终点 $w[C]$ 在0.03%~0.07%时,随着碳含量的增加氮含量为降低趋势。

4)转炉终点补吹平均一次增 $w[N]$ 为 5.5×10^{-6} 。

5)转炉出钢过程弱脱氧工艺及铁水 $w[S]$ 为0.028%以下有利于降低钢水氮含量。

6)精炼炉冶炼后期喂钙线时调整炉盖内正压状态,对降低钢水增氮效果明显,可减少增氮量 5×10^{-6} 。

通过优化转炉冶炼、出钢及精炼过程工艺、连铸机保护浇注等,固化低氮钢低成本生产工艺,非精炼低碳钢成品 $w[O]$ 控制在 $(110 \sim 150) \times 10^{-6}$ 、 $w[N]$ 控制在 27×10^{-6} 以下,脱硫钢成品 $w[N]$ 控制在 38×10^{-6} 以下,较工艺改进前平均降低 17.8×10^{-6} ,产品质量稳定性得到较好控制。

参考文献

- [1] 齐磊. IF钢氮含量控制技术[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [2] 蒲雪萍. 淮钢高洁净弹簧钢精炼工艺研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [3] 沈岸明, 刘国庆. X80管线钢生产过程氮的控制实践[J]. 中国冶金, 2014, 24(9): 39-43.
- [4] 郭建龙, 王伟, 仇圣桃, 等. GCr15轴承钢VD脱氮工艺分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 77-79.
- [5] 杨成威. EAF-LF/VD-HCC工艺夹杂物行为研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2006.
- [6] 项长祥. 钢液和铁液的吸氮脱氮动力学研究[J]. 河北冶金, 1997(1): 20-24.
- [7] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [8] Chatterjee S, K Rout B. Nitrogen control in the basic oxygen steel-making process[C]. AISTech 2023 Proceedings. 2023: 752-754.
- [9] 陆锦祥, 王忠英, 陈水盛, 等. 100 t BOF-LF-RH-CC工艺冶炼结构钢时钢中氮的行为及控制[J]. 特殊钢, 2009, 30(6): 26-28.
- [10] Zhao. Y, Yang. Y, Barati. M & McLean A. Strategies for nitrogen control during the production of interstitial-free steel. Ironmaking & Steelmaking, 20 October 2017: 1-7.
- [11] 刘军, 薛文辉. 炼钢厂钢水低氮控制的生产技术[J]. 金属世界, 2019(3): 68-72.
- [12] 李勇. 炼钢过程中钢水氮含量控制[J]. 钢铁, 2010, 45(10): 52-56.
- [13] 张钟铮, 王晓峰, 费鹏, 等. IF钢中氮含量控制技术[J]. 炼钢, 2014, 30(1): 29-33.
- [14] 张鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 12-33.
- [15] 冯俊鹏, 朱坦华, 徐桂喜, 等. 一种可降低红送裂纹发生率的超低微合金钢板及生产方法: CN117467901A [P]. 2024-01-30.
- [16] 邢梅峦, 包燕平, 林路. 130 t BOF-LF-150 mm×150 mm CC流程控制高碳钢SWRH82B氮含量的工艺实践[J]. 特殊钢, 2015, 36(2): 25-27.
- [17] 左启伟, 安霞, 杨静波, 等. ER70S-6钢氮氧含量控制[J]. 炼钢, 2014, 30(5): 22-25+42.