包钢 210 t RH 脱氮能力研究*

安子超，张文凯，武晓晶

（内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 通过对包钢薄板厂 210 t RH 精炼炉进行脱氮工艺试验，分析了钢水脱氮率与初始 w [N]、真空度循环次数以及渣层厚度之间的关系。试验结果表明：真空下的脱氮率受诸多工艺因素的相互共同制约；初始 w [N] 对脱氮率的影响呈现阶梯性的特点；低真空度是获得较高脱氮率的必要条件；循环次数保持在 10 ~ 12 次范围内脱氮效果最佳；渣层厚度对脱氮有双重影响，应合理控制渣量，使渣层厚度避开区间 130 ~ 150 mm 区间。

关键词： RH 脱氮，循环次数，渣层厚度，真空度

中图分类号： TF704.7 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009 - 5438(2017) 05 - 0017 - 04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.05.006

Study on Denitrification Capacity of 210 t RH in Baotou Steel

AN Zi - chao, ZHANG Wen - kai, WU Xiao - jing

(*CSP Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp., Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: The relationship between denitrification rate of molten steel and initial w [N] and vacuum degree cycle number and thickness of slag layer is analyzed through denitrification process of 210 t RH refining furnace in Sheet Plant of Baotou Steel. Test results show that: The denitrification rate under vacuum is controlled by many process factors; the influence of initial w [N] on denitrification rate exhibits ladder characteristics; low vacuum is a necessary condition for obtaining higher denitrification rate; the effect of denitrification is the best when cycle number keeps within 10 ~ 12 times; the thickness of slag layer has double influence on denitrification, and the slag quantity should be controlled reasonably so that the thickness of slag layer can be avoided from 130 to 150 mm interval.

Key words: RH; denitrification; cycle number; thickness of slag layer; vacuum degree

氮对绝大多数钢种来说，是一种有害元素，降低钢的冷弯和成型性能，容易造成时效和蓝脆问题，降低钢材的韧性和塑形[1-3]。如在生产汽车、家电用薄钢板中，为了提高钢材的深冲性能，一般要求严格控制钢中的(w [C] + w [N]) $\leqslant 50 \times 10^{-6}$。RH 精炼炉具有良好的真空脱气处理功能，是控制钢水w [N] 的关键工艺之一，因此弄清 RH 冶炼过程各工艺参数对钢水 w [N] 的影响具有重要的实践意义。本文对包钢薄板厂 1#210 t RH 精炼炉冶炼过程中影响钢水w [N] 的主要工艺参数进行系统分析，提出了 RH 精炼炉真空脱氮的具体措施。

1 工艺试验条件

包钢薄板厂 Q345E 钢冶炼工艺流程为 BOF→LF→RH→HP 流程。其中 210 t RH 钢包精炼炉具有真空脱气、成分和温度微调等功能。钢水经 LF 处理结束后，直接进入 RH 工位进行精炼。

RH 精炼过程主要操作流程为：进站→测温→

* 收稿日期：2017 - 06 - 30

作者简介：安子超(1985 -)，男，河北省大城县人，工程师，现从事炼钢工艺工作。

抽真空→取样→破真空→钙处理→软吹→加保温剂→出站。

RH 真空处理过程中环流气体为氩气，环流气体流量为 1 200 ~ 1 500 L/min，精炼周期为 45 min 左右，真空度小于0.10 kPa 时保持时间大于12 min，软吹时间为 13 min。试验钢种为 Q345E，其化学成分见表 1。

表 1 试验钢种的化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Al_s
0.155 ~ 0.175	0.27 ~ 0.35	1.33 ~ 1.40	≤0.017	≤0.005	0.017 ~ 0.027

2 试验效果和分析

为了探究 RH 精炼过程中影响氮含量的主要因素，对工业生产中主要工艺参数进行试验分析，试验结果见表 2。

表 2 RH 精炼过程各工艺参数统计(30 炉)

项目	终点 w [N] /10^{-6}	脱氮率 /%	渣层厚度 /mm
最大值	69.60	68.40	200
最小值	23	17.78	120
平均值	43.56	48.58	160

对真空前后总 w [N] 的变化进行分析，在真空条件下 w [N] 降低值最大为 102.6×10^{-6}，最小为 25.1×10^{-6}，平均降低 51.97×10^{-6}。

2.1 初始 w [N] 与脱氮率的关系

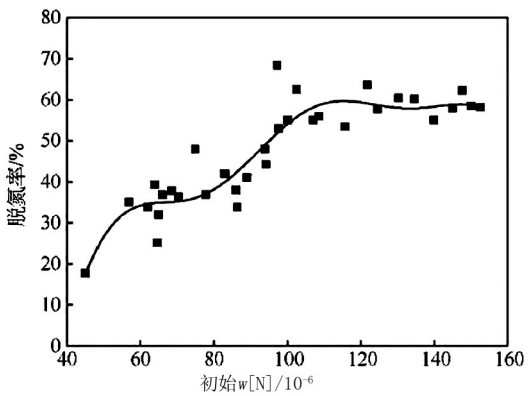


图 1 初始 w [N] 对脱氮率的影响

由图 1 可见，脱氮率与初始 w [N] 不是简单的线性关系，总体来说，脱氮率随着初始 w [N] 的增加而增加，但是具有一定的阶段性。当初始 w [N] 大于 95×10^{-6} 时，脱氮率保持在 55% ~65% 之间，具有良好的脱氮效果；当初始 w [N] 为 $(50\sim95)\times10^{-6}$ 之间时，脱氮率保持在 30% ~40% 之间，脱氮效果一般；而当初始 w [N] 低于 50×10^{-6} 时，脱氮率小于 20%，脱氮效果较差。

氮在钢液中以原子状态存在，其溶解反应为[4]：

$$\frac{1}{2}N^2 = [N] \tag{1}$$

$$K = \frac{w[N]f_{[N]}}{\sqrt{P_{N_2}}} \tag{2}$$

其中：w [N] 为钢液中氮的质量分数，%；P_{N_2} 为气相中氮的分压，Pa；$f_{[N]}$ 为钢液中元素活度相互作用系数；K 为平衡常数。用式(3)计算[4]：

$$\lg K = -\frac{188}{T} - 1.245 \tag{3}$$

由式(2)和式(3)可知，氮的溶解反应是一个吸热过程，随着温度的升高，w [N] 增加。真空条件下，氮的流向主要由钢水自由表面的氮势和气相中的氮势所决定的。真空条件下的脱氮是氮从金属－气相界面上挥发的过程，脱氮速度受液相侧氮的传质速度和界面化学反应共同决定的，其动力学积分表达式为[5]：

$$\ln\frac{w[N]_T^* - w[N]^*}{w[N]_0 - w[N]^*} = C_i\Delta t \tag{4}$$

其中：w [N]* 为平衡氮质量分数；w [N]$_T^*$ 为 t 时刻钢水中的氮质量分数；w [N]$_0$ 为初始氮质量分数；C_i 为子阶段 i 的脱氮常数。

当初始氮的质量分数超过 100×10^{-6} 时，钢水传质系数大，脱氮动力学条件好，而当初始氮含量较低时，脱氮反应为二级反应，RH 脱氮反应仅在距钢水自由表面 2.5×10^{-3} m 的深度以内才能够进行[6]，脱氮动力学条件较差，在极低氮时，钢水深脱氮较困难。RH 处理后钢中的 w [N] 随初始 w [N] 的增加而呈阶段性增加，因此钢中要获得较低的 w [N]，应尽可能降低 RH 处理前钢液中的 w [N]。

2.2 真空度与脱氮率的关系

由图 2 可见，脱氮率随着真空度的增加而呈降低趋势。低真空度是获得良好脱氮率的必要条件[7]。由式(2)可知，随着氮分压的降低，w [N] 降低。一方面，从热力学分析看，降低真空度后钢液实际 w [N] 与该真空下平衡 w [N] 差值增加，有利于脱氮反应的进行；另一方面，随着真空度的增加，影响脱氮反应表观反应级数。研究表明[4]，在 67 Pa 真

空下脱氮符合一级反应特征，脱氮反应动力学条件好，有利于脱氮。但脱氮率具有一定的波动性，主要是受到其它工艺因素的影响和限制。

图 3 和图 4 为低真空（$p < 100$ Pa）状态下的有效保持时间与脱氮率之间的关系。

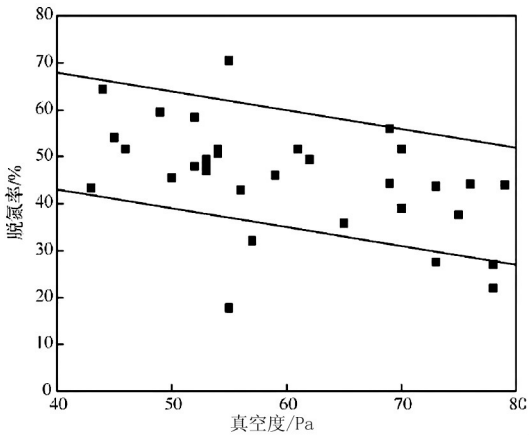


图 2　真空度对脱氮率的影响

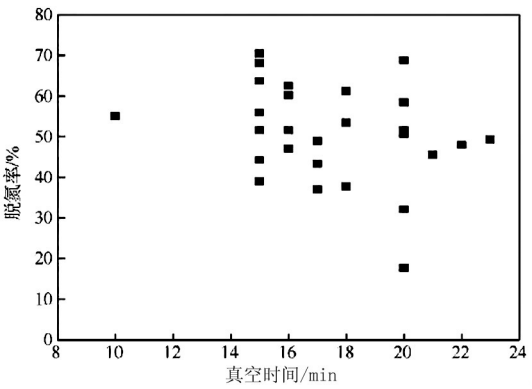


图 3　实际生产中真空时间统计散点图

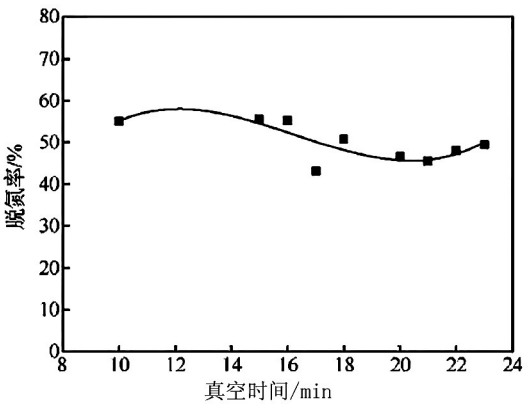


图 4　真空保持时间对脱氮率的影响

由图 3 可以看出，真空保持时间主要集中在 15 ~ 20 min 之间，真空时间与脱氮率的关系较为复杂，随机性强。首先，脱氮率在相同真空时间下波动较大，这说明真空时间对脱氮率的影响还受到其它因素的制约，并且相关性较大；其次，在 15 ~ 20 min 之间，脱氮率随着平均真空时间的增加变化不大，这主要是由于熔池从常压下抽到真空会产生沸腾，钢水沸腾时氮的传质系数比不产生沸腾的传质系数约增加 5 倍[6]。由式（4）可知，脱氮过程主要受到脱氮常数的制约，RH 精炼前期脱钢液传质系数较大，所以脱氮常数较大，脱氮速率较快，脱氮反应主要是在 RH 精炼的前中期完成的，后期脱氮率已处于饱和稳定状态。因此，实际生产中从脱氮的角度考虑，可以适当减少真空保持时间，应强化 RH 精炼前期的脱氮功能。

2.3　循环次数对脱氮的影响

循环次数集中体现了氩气流量、真空时间、真空度、吹氩时间对脱氮的综合作用效果，是反映 RH 综合脱氮能力的重要参数。图 5 是循环次数与脱氮率的试验结果。

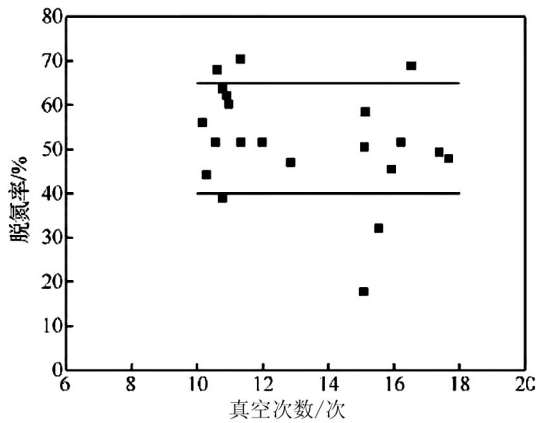


图 5　循环次数对脱氮率的影响

由图 5 可看出，随着循环次数的增大，虽然有个别点的脱氮率降低，但总体上脱氮率基本保持不变。首先，当钢水循环 10 ~ 12 次以后，钢液的 w [N] 已经基本接近钢液该真空度下的平衡含量，随着循环次数的继续增加，钢水 w [N] 不再下降；其次，循环次数过大时，钢水的混匀时间减少，导致脱气后的钢水与未脱气的钢水不能够充分均匀混合，存在循环死区，使循环脱气过程中的有效循环比例降低，钢水 w [N] 不再下降；再次，随着钢水 w [N] 的不断降低，脱氮反应主要为二级反应，脱氮动力学条件变差，脱氮率不再增加。因此实际生产过程中，不能单方面通过调节氩气流量、真空时间等参数来控制脱氮量，而应使循环次数稳定控制在 10 ~ 12 次，保证较高的

脱氮率。

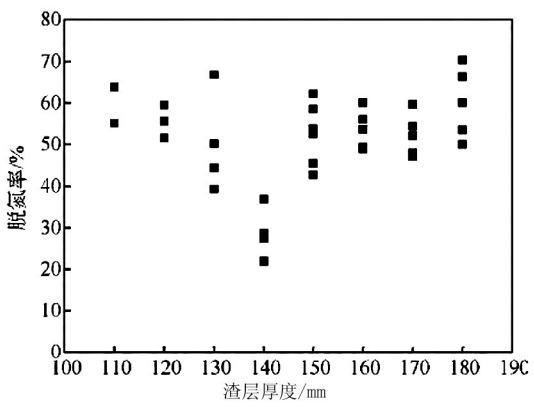
2.4 渣层厚度对脱氮的影响

在整个RH脱气过程中，大部分钢液表面始终覆盖着LF炉精炼终点渣。LF炉精炼终点渣化学成分(30炉)见表3。

表3 炉渣化学成分(质量分数) %

CaO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	FeO	MgO	S
58.71	8.32	28.36	0.12	0.53	5.63	0.25

表3的化学成分的渣层覆盖下，钢水在真空处理时，脱氮速度受到影响，具体见图6。



渣层厚度/mm

图6 渣厚对脱氮率的影响

由图6可见，随着渣层厚度增加，脱氮率总体呈先降低后增加的趋势，存在着一个临界渣层厚度。项长祥[8]等研究表明$CaO-Al_2O_3-SiO_2$渣系可作为绝缘层有效地防止氮在钢液和气相间传质。RH工位钢包通过钢包车液压装置向上上升到固定高度，当渣厚较薄时，RH浸渍管进入钢水的深度相对增加，浸渍管上下的相对压差增50 mm时，一方面渣层的隔绝空气效果较好，防止钢液增氮，另一方面由于渣层较厚，钢液不易裸露，可采用较大环流量操作，促进钢液循环，提高脱氮效果，但实际生产中渣层不能过厚，否则容易导致精炼渣被吸入真空室，污染钢液，损坏设备甚至引起生产事故。因此，必须合理地控制渣层的厚度，通过控制转炉下渣量、LF精炼炉加料量，保证LF出站时渣层的厚度避开130～150 mm。

3 结论

(1) 现行工艺下，RH精炼炉脱氮能力是有限的，应尽量减少RH处理前钢水中$w[N]$。初始$w[N]$对脱氮率的影响呈现阶梯性的特点，当初始$w[N]$大于100×10^{-6}时，脱氮率为55%左右；当初始$w[N]$在$(50\sim90)\times10^{-6}$时，脱氮率为35%左右。

(2) RH真空下的脱氮，受诸多因素的制约。低真空度是获得较高脱氮率的必要条件；真空度、氩气流量、真空时间等参数共同影响RH的脱氮效果，并且相关性较大。

(3) 实际生产中，应合理控制氩气流量、真空度、真空时间等工艺参数，使循环次数保持在10～12次范围内，脱氮效果最佳。

(4) 渣层厚度对脱氮有双重影响。应合理控制转炉下渣量、LF精炼炉渣量，使RH渣厚避开130～150 mm区间。

参 考 文 献

[1] 刘文飞，李超，崔福祥，等. 转炉工序钢水氮含量控制的研究[J]. 鞍钢技术，2011，(4)：11.

[2] 高泽平. 炉外精炼教程[M]. 北京：冶金工业出版社，2007.

[3] 傅杰. 薄板坯连铸连轧钢中氮的控制[C]. 薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会第三次技术交流会论文集[A]. 唐山：薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会，2005.94.

[4] 蒋国昌. 纯净钢及二次冶炼[M]. 上海：上海科学技术出版社，1996.

[5] S Ban－YF，Ishli. Rate of Nitrogen disorption from liguid iron－chromium alloys with argon[J]. Met Trans：B，1988，233：233.

[6] 刘浏. RH真空精炼工艺与装备技术的发展[J]. 钢铁，2006，41(8)：8.

[7] 唱鹤鸣. 熔渣下钢液真空吹气脱氮的研究[D]. 北京：北京科技大学，1996.

[8] 项长祥，Gammal TE L. 钙基中性渣及氧化性渣覆盖时氮在钢液和气相间的传质[J]. 钢铁研究，1997，(5)：11.