

· 工艺技术 ·

80 t 单嘴真空精炼炉冶金功能的生产实验分析

段建平¹ 张永亮¹ 杨学民² 成国光³ 张 鉴³

(1 山西太钢不锈钢股份有限公司, 太原 030003; 2 中国科学院过程工程研究所, 北京 100080;

3 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要 对 80 t 单嘴真空精炼炉的冶金功能进行了生产实验分析, 结果表明, 单嘴精炼炉具有脱氢、脱氮、脱碳、脱氧、脱硫、化学升温、去除钢中夹杂物和合金成分调整等冶金功能。利用 80 t 单嘴精炼炉精炼钢水, 实验合结钢中氢含量可达 $(0.9 \sim 1.2) \times 10^{-6}$ 、氧含量 $(9 \sim 12) \times 10^{-6}$, 超低碳钢中碳含量为 $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$ 、氮含量 $(29 \sim 37) \times 10^{-6}$ 、钢水中硫含量为 $(10 \sim 30) \times 10^{-6}$; 单嘴精炼炉具有较好的化学升温效果、去除夹杂物效果同 RH 精炼炉相当; 采用单嘴精炼炉进行 20 炉超低碳钢合金成分调整结果表明, 合金收得率高, 硅、锰、铝的收得率分别为 93% ~ 96%、93% ~ 95%、64% ~ 67%。

关键词 单嘴精炼炉 冶金功能 实验

Analysis of Commercial Production Test on Metallurgical Functions of an 80 t Single Snorkel Vacuum Refining Furnace

Duan Jianping¹, Zhang Yongliang¹, Yang Xuemin², Cheng Guoguang³ and Zhang Jian³

(1 Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003;

2 Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100080;

3 School of Metallurgy and Ecology Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract A primary test analysis on metallurgical functions of an 80 t single snorkel vacuum refining furnace has been carried out. Results show that the single snorkel vacuum refining furnace has the metallurgical functions including dehydrogenation, denitrating, decarburizing, deoxidation, desulphurization, liquid heating by chemical reaction, removing inclusions in liquid and adjusting alloy component. By using the 80 t single snorkel vacuum refining furnace to refine liquid, the hydrogen and oxygen content in alloy constructional steels are respectively reduced to $(0.9 \sim 1.2) \times 10^{-6}$ and $(9 \sim 12) \times 10^{-6}$, in ultra-low carbon steels, the carbon content is $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$, the nitrogen content is $(29 \sim 37) \times 10^{-6}$ and the sulphur content is $(10 \sim 30) \times 10^{-6}$; the single snorkel refining furnace has better heating function by chemical exothermic reaction and its inclusions removing effect is equal to that of RH refining unit; the results of 20 heats ultra-low carbon steel alloy-compound-adjusting in single snorkel refining furnace show that the yield of alloy elements is high, the yields of silicon, manganese and aluminum are respectively 93% ~ 96%, 93% ~ 95% and 64% ~ 67%.

Material Index Single Snorkel Vacuum Refining Furnace, Metallurgical Functions, Experiment

多功能单嘴真空精炼装置(简称单嘴精炼炉)是一种新型炉外精炼设备^[1-4]。我国于 1976 年进行了 13 t 单嘴精炼炉车轴钢脱氢工业实验; 1983 年进行了 35 t 单嘴精炼炉水模研究^[1]; 1992 年进行 35 t 单嘴精炼炉轴承钢脱氧、去除夹杂物等的工业实验^[1,3]; 2004 年进行了 250 t 单嘴精炼炉 IF 钢脱碳的初步工业研究和脱碳特性水模型研究^[4]。日本新日铁公司基于改进 DH 脱气能力的目的, 对单嘴精炼炉进行了开发研究^[5,6], 于 1991 年将 1 座 175 t 的 DH 改造为单嘴精炼炉, 并命名为 Revolutionary Degassing Activator (REDA)^[5], 并研究其脱碳行为^[5,6]。1994 年将 1 座 330 t 的 DH 也改造为 REDA, 1998 ~ 1999 年对 REDA 的脱碳特性进行水模型研究并研究了 REDA 冶炼不锈钢技术^[6]。目前 REDA 装置在日本主要应用于低碳和超低碳不锈钢

的生产^[6]。

单嘴精炼炉^[1-4]的主要构件为以浸渍管、真空系统为代表的上部结构和以钢包偏心底吹氩为代表的下部结构。单嘴精炼炉是自钢包底部偏心处吹入氩气, 氩气泡在钢包内钢液中上升, 经插入钢液的浸渍管进入真空室内; 氩气泡在钢液中上升构成相对于 CO 等气体而言为真空的氩气泡, 促使脱碳和脱气等反应进行, 并驱动钢液在钢包、浸渍管和真空室组成的区域内循环; 保持真空系统合理的真空度, 可进一步促进流动到真空室内的钢液的脱碳和脱气等反应持续进行。

在对 1 座 80 t RH 改造而得到的 80 t 单嘴精炼炉进行实验的基础上^[7-9], 本文对 80 t 单嘴精炼炉的冶金功能进行了初步实验分析。

1 80 t单嘴精炼炉主要技术参数

由80 t RH改造而来的80 t单嘴精炼炉的主要参数见表1,结构见图1。相对于80 t RH,80 t的单嘴精炼炉在结构上主要有如下变化:(1)将RH精炼炉内径较小的提升管和下降管改造为内径为1 m的大口径单插入管,即单浸渍管;(2)改造原来的RH真空室下部,使其和单浸渍管连接;(3)将原来RH精炼炉提升管吹Ar改为由钢包底部偏心位置的透气砖吹入钢包,增加了Ar气泡在钢液内的上升路径。

表1 80 t单嘴精炼炉主要参数

Table 1 Main parameters of 80 t single snorkel refining furnace

项目	参数
单炉处理量/t	80
工作真空度/Pa	67
氧枪形式	MFB氧枪
氧枪流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1 200
真空室内径/mm	1 338
浸渍管内径/mm	1 000
底吹Ar流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~600

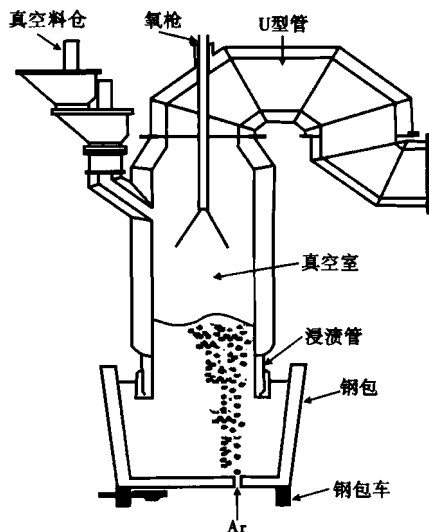


图1 80 t单嘴精炼炉示意图

Fig. 1 Schematics of 80t single snorkel refining furnace

2 80 t单嘴精炼炉实验工艺

实验钢种化学成分见表2。生产工艺路线为:铁水预处理→转炉冶炼→单嘴精炼炉精炼→连铸。

单嘴精炼炉实验工艺为:钢包到精炼工位后,测温取样、测渣厚及钢包自由空间→顶升钢包到预定位置→开启底吹气体吹开渣面→继续顶升钢包,浸入管插入钢水中→抽真空至工作真空度并保持→调整底吹气体流量→真空处理、过程中测温取样→加铝脱氧→脱硫→合金化→破真空→降钢包、测温取样。

表2 实验钢种的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of test steels/%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
超低碳钢	≤ 0.005	1.00~1.50	0.30~0.60	≤ 0.020	≤ 0.005	-	-	0.20~0.50
合结钢	0.30~0.40	0.40~0.80	0.60~1.00	≤ 0.020	≤ 0.010	1.40~2.00	0.30~0.55	-

根据对80 t单嘴精炼炉设备投入前期进行的127炉脱碳工艺实验结果的分析^[7],在实验炉次工作真空度均 ≤ 100 Pa的情况下,影响单嘴精炼炉脱碳效果的主要工艺因素为钢包底吹气体流量、钢包自由空间高度、钢包内炉渣层厚度等;80 t单嘴精炼炉脱碳合理的钢包底吹气体流量为300~400 L/min、钢包自由空间高度为400~500 mm、应尽可能减少钢包内炉渣层厚度。为此在进行单嘴精炼炉冶金效果的实验过程中,控制实验炉次工作真空度 ≤ 100 Pa、钢包底吹气体流量300~400 L/min、钢包自由空间高度400~500 mm、钢包渣层厚度 < 50 mm。

3 80 t单嘴精炼炉实验结果及生产分析

3.1 脱氢

单嘴精炼炉脱氢实验连续进行4炉,实验钢种为合结钢,真空保持时间为18 min,结果如表3。

表3 单嘴精炼炉精炼前后[H]变化

Table 3 Change of [H] before and after refining in single snorkel refining furnace

实验钢种	炉次	[H]/ 10^{-6}		脱氢率/%
		精炼前	精炼后	
合结钢	1	4.7	1.0	78.7
	2	4.2	1.2	71.4
	3	4.3	0.9	83.7
	4	4.1	0.9	78.0
	平均值	4.3	1.0	76.7

钢液初始氢含量 $(4.1 \sim 4.7) \times 10^{-6}$,精炼结束钢中氢含量 $(0.9 \sim 1.2) \times 10^{-6}$,单嘴精炼炉脱氢率为71.4%~83.7%,平均76.7%。实验表明,单嘴精炼炉具有较好的脱氢效果,钢中氢含量 $\leq 1.0 \times 10^{-6}$ 。

3.2 脱氮

脱氮实验连续进行10炉,实验钢种为超低碳钢,单嘴精炼炉实验真空脱碳时间为18 min(表4)。

单嘴精炼炉脱碳处理前钢中氮含量为 $(29 \sim 41) \times 10^{-6}$,平均 33.4×10^{-6} ,脱碳处理结束合金化前钢液中氮含量为 $(21 \sim 30) \times 10^{-6}$,平均 24.2×10^{-6} ,精炼结束后钢中[N]为 $(29 \sim 37) \times 10^{-6}$,平均 31.5×10^{-6} 。由实验结果可以看出,单嘴精炼炉脱碳处理过程中,有较好的脱氮效果,脱氮率平均

表 4 单嘴精炼炉精炼过程 [N] 变化 / 10⁻⁶
Table 4 Change of [N] before and after refining in single snorkel refining furnace / 10⁻⁶

炉次	精炼前	合金化前	精炼结束后
1	30	22	29
2	29	21	29
3	35	27	34
4	34	25	32
5	29	21	28
6	37	26	33
7	29	21	28
8	32	22	30
9	41	30	37
10	38	27	35
平均值	33.4	24.2	31.5

27.3%，脱碳处理结束合金化过程中，由于加入大量的硅、锰等合金，造成钢液在精炼后期增氮。

3.3 脱碳

脱碳实验钢种为超低碳钢，超低碳钢转炉冶炼出钢后不脱氧，直接进入单嘴精炼炉脱碳，当钢水中初始碳含量 ≤ 0.035% 时，在真空条件下利用碳氧反应（自然脱碳）将碳脱除到钢种要求目标值；当初始碳含量 > 0.035% 时，首先利用 MFB 氧枪进行吹氧脱碳（强制脱碳），然后利用碳氧反应（自然脱碳）将碳脱除到钢种要求目标值。二种工艺的脱碳实验各跟踪进行了 6 炉，脱碳处理时间均为 18 min（图 2）。

由图 2 可以看出，两种脱碳实验工艺脱碳处理后，钢中碳含量均达到 (10 ~ 20) × 10⁻⁶，符合超低碳钢碳含量目标值要求。

3.4 脱氧

单嘴精炼炉脱氧实验连续进行了 4 炉，实验钢种为合结钢，实验钢种真空处理时间为 18 min，真空精炼后期加铝强化脱氧，真空处理结束后对钢液进行吹氩软搅拌，软搅拌时间 > 10 min。分别取精炼

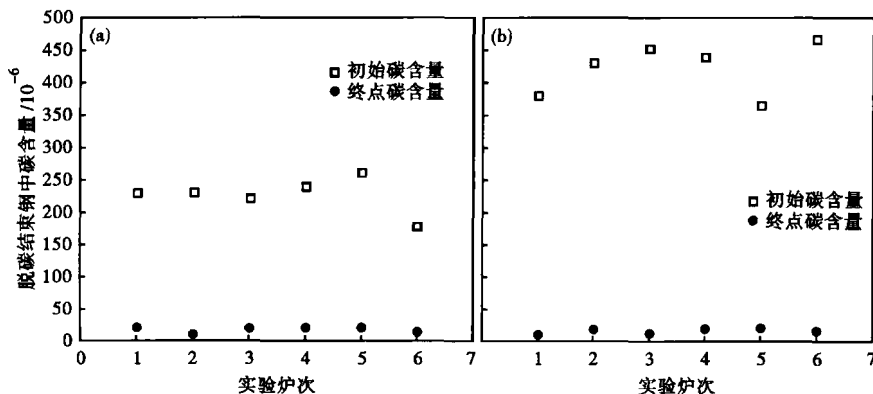


图 2 80 t 单嘴精炼炉脱碳后钢中含量：(a) 自然脱碳；(b) 强制脱碳 + 自然脱碳
Fig. 2 Carbon content in steel after decarburization in 80 t single snorkel refining furnace: (a) natural decarburization; (b) forced decarburization + natural decarburization

表 5 单嘴精炼炉精炼前 [O] 和铸坯中的氧含量
Table 5 [O] before refining in single snorkel refining furnace and oxygen content in casting bloom

实验钢种	炉次	[O] / 10 ⁻⁶	
		精炼前	铸坯
合结钢	1	35	12
	2	32	11
	3	30	11
	4	33	9
平均值		32.5	10.8

前钢水样和铸坯样分析钢中氧含量，结果如表 5。

由实验结果可以看出，单嘴精炼炉处理前钢中氧含量 (30 ~ 35) × 10⁻⁶，连铸坯中氧含量为 (9 ~ 12) × 10⁻⁶，钢中氧含量明显降低。钢中氧含量降低主要通过 3 个途径：真空精炼过程中，钢中碳氧反应降低了钢中溶解氧含量；加铝脱氧后钢中溶解氧含量进一步降低；钢中 Al₂O₃ 夹杂上浮，降低了钢中全氧含量。

3.5 脱硫

脱硫实验的钢种为超低碳钢，精炼过程中脱硫的钢水首先进行铝脱氧，控制钢水中铝含量 ≥ 0.10%，脱硫剂采用低碳石灰和萤石，实验所用脱硫剂化学成分见表 6。

表 6 工业实验所用脱硫剂化学成分 / %
Table 6 Ingredient of desulphurizer for commercial test / %

物料名称	CaO	CaF ₂	C	S
低碳石灰	91.5	-	0.20	0.025
萤石	-	85.6	0.15	0.035

单嘴精炼炉脱硫工艺实验连续进行 17 炉，脱硫剂低碳石灰加入量为 5.0 ~ 6.0 kg/t_钢，萤石加入量为 3.5 kg/t_钢，脱硫实验结果如图 3。实验炉次进站硫含量为 (33 ~ 95) × 10⁻⁶，平均 59.94 × 10⁻⁶，处理结束后钢中硫含量为 (10 ~ 30) × 10⁻⁶，平均 17.94 × 10⁻⁶，最低硫含量为 10 × 10⁻⁶；实验平均脱硫率 69.76%，单嘴精炼炉有较好的脱硫效果。

3.6 化学升温

化学升温是利用 MFB 氧枪吹入钢中的氧和加入的铝反应放出的化学热来加热水。连续进行 24 炉钢水的化学升温实验，每炉加铝量 15 ~ 50 kg，平均每炉 30 kg，吹氧

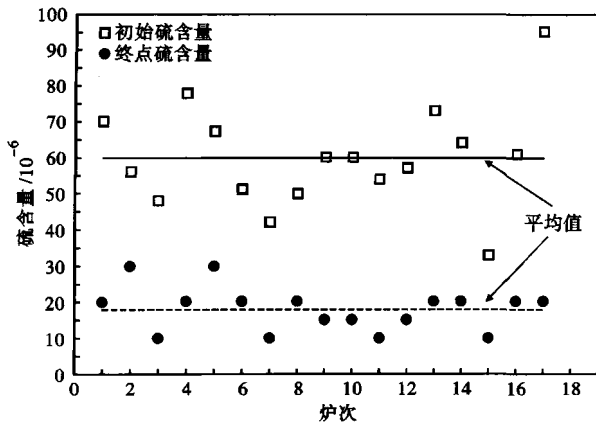


图 3 单嘴精炼炉实验炉次脱硫前后钢中硫含量
Fig.3 Sulphur content in steel of test heats refining in single snorkel refining furnace before and after desulphurizing

表 7 单嘴精炼炉与 RH 精炼超低碳钢中电解夹杂含量对比/ 10^{-6}

Table 7 Comparison of electro-analysis of inclusions in ultra-low-carbon steel refined by single snorkel refining furnace and RH unit / 10^{-6}

精炼方式	炉次	MgO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	CaO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	合计
单嘴精炼炉	1	3	10	2.4	24.7	9.6	16	4	69.7
	2	11	24	2.1	2.1	1.2	20	16.8	77.2
	3	1.4	21	2.7	2.7	2.7	30	48.5	109
RH	10.5 ~ 16.7	9.6 ~ 89.2	1.6 ~ 3.0	1.3 ~ 1.8	4.5 ~ 11.2	7.7 ~ 15.6	9.8 ~ 40.8	53.3 ~ 174.6	

量(10 ~ 50) m³/炉, 平均 23 m³/炉, 升温量 5 ~ 20 °C, 平均为 10 °C。折算后可知, 80 t 单嘴精炼炉水温度每升高 10 °C, 需加铝 0.38 kg/t_钢, 吹氧 0.29 m³/t_钢。

3.7 钢中夹杂物含量

随机抽取 3 炉采用单嘴精炼炉冶炼的超低碳钢, 在铸坯上取样分析其电解夹杂含量, 并与同期 80 t RH 生产的 10 炉该钢种的电解夹杂含量对比, 结果见表 7。由表 7 可以看出, 单嘴精炼炉具有较好的去除夹杂物能力, 采用单嘴精炼炉精炼超低碳钢中电解夹杂物含量与采用 RH 精炼相当。

3.8 合金成分调整与钢液成分偏差

使用单嘴精炼炉连续实验生产 20 炉超低碳钢, 真空脱碳结束加铝强制脱氧, 脱氧后进行钢水合金成分调整, 合金加入后钢液在真空状态下循环 5 min, 取样分析钢水成分满足钢种冶炼要求。计算钢水中 Si、Mn、Al 合金或金属的收得率, 实验炉次合金硅的收得率为 93% ~ 96%, 平均 94.39%, 锰的收得率 93% ~ 95%, 平均 94.07%, 铝的收得率为 64% ~ 67%, 平均 65.41%, 合金收得率较高, 而且稳定。

对以上 20 炉超低碳钢分别在连铸开浇 10、20、30 min 取样分析钢水成分, 结果表明钢水中 C、Si、Mn、Al 的成分偏差分别为 $\leq \pm 0.0003\%$ 、 $\leq \pm 0.02\%$ 、 $\leq \pm 0.01\%$ 、 $\leq \pm 0.01\%$, 钢水成分偏差较小, 而且均在目标值要求范围内。

4 结论

(1) 单嘴精炼炉具有脱氢、脱氮、脱碳、脱氧、脱硫、化学升温、去除钢中夹杂物和合金成分调整等冶金功能。

(2) 利用 80 t 单嘴精炼炉精炼钢水, 实验合结钢中氢含量可达 0.9×10^{-6} 、氧含量可达 9×10^{-6} , 实验超低碳钢中碳含量可达 10×10^{-6} 、真空脱碳过程中钢水平均脱氮率可达 27.3%、钢水中硫含量可达 10×10^{-6} , 平均脱硫率可达 69.76%。

(3) 80 t 单嘴精炼炉具有较好的化学升温效果, 钢水温度每升高 10 °C, 需加铝 0.38 kg/t_钢, 吹氧 0.29 m³/t_钢。

(4) 80 t 单嘴精炼炉去除夹杂物效果同 RH 精炼炉相当, 采用单嘴精炼炉进行合金成分调整, 合金收得率高且稳定, 钢水成分均匀性好。

参考文献

- 张 鉴, 成国光, 杨念祖, 等. 单嘴精炼炉处理轴承钢的脱氧工艺. 钢铁, 1995, 30(5): 19
- 王 潮, 张 鉴, 杨念祖, 等. 单嘴精炼炉流场及环流速度的水模型研究. 特殊钢, 1998, 19(2): 12
- 成国光, 张 鉴, 杨念祖, 等. 单嘴精炼炉轴承钢脱氧的动力学模型. 特殊钢, 1994, 15(5): 22
- 王 华, 赵 建, 成国光, 等. 单嘴精炼炉脱碳特性水模型研究. 安徽工业大学学报, 2005, 22(4): 623
- Aoki H, Kitamura S, Miyamoto K. Development of New Secondary Refining Process-REDA. Iron & Steelmaker, 1999, 26(7): 17
- Miyamoto K, Sugano H, Shinkai A, et al. Reaction Behavior of Stainless Steel in New Type Vacuum Degasser (Development of New Type Vacuum Degasser (REDA)-5). CAMP-ISIJ, 1999, 12(4): 748
- 秦 哲, 朱梅婷, 成国光, 等. 单嘴精炼炉合金料加入方式及混匀特性水模研究. 特殊钢, 2010, 31(2): 5
- 段建平, 张永亮, 杨学民, 等. 80 t 单嘴真空精炼装置脱碳工艺试验研究. 钢铁, 2011, 46(6): 32
- 段建平, 张永亮, 杨学民, 等. 80 吨多功能单嘴真空精炼炉脱硫试验研究. 炼钢, 2011, 27(6): 18

段建平(1964-), 男, 高级工程师, 1988 年北京科技大学毕业, 炼钢工艺技术研究。

收稿日期: 2011-07-08