



ANS-OB 法治炼 1Cr13 不锈钢关键冶金技术

李博洋^{1,2}, 陆志豪^{1,2}, 滕行泽², 许孟春², 金喆², 符显斌²

(1 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

摘要: 针对 ANS-OB 冶炼 1Cr13 不锈钢过程中的关键冶金技术展开研究, 通过对该工艺热力学与动力学分析, 研究了出钢温度、精炼温度、气体流量、冶炼时间、还原脱氧对冶炼工艺的影响, 明确了 1Cr13 不锈钢冶炼的关键技术指标。结果表明, 转炉和中频炉出钢温度应高于 1 600 °C, 保证后续精炼温度, 减少添加合金导致的温度或者成分不合。ANS-OB 工艺精炼温度范围为 1 650~1 700 °C, 其供氧强度由 0.8 m³/(t·min) 逐渐降低至 0.4 m³/(t·min), 并逐渐提高供氩强度, 具体为 O₂ 与 Ar 的流量比为 1:(0.86~2.16), 主吹氧时长为 30~34 min, 将钢水中 C 含量降至 0.08% 以下。然后, 采用硅铁进行还原脱氧, 加入量为 10 kg/t, 维持供 Ar 强度为 0.5 m³/(t·min), 将钢水中 w[O] 降至 0.003 0% 以下。最后, 加入硅铁、锰铁等合金调整钢水成分。根据制定的工艺方案进行冶炼, 取得了良好的工业试验结果。

关键词: ANS-OB; 不锈钢; 热力学; CO 分压; 温度

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2025-00057 **中图分类号:** TF769

Key Metallurgical Technologies for Smelting 1Cr13 Stainless Steel via ANS-OB Process

Li Boyang^{1,2}, Lu Zhihao^{1,2}, Teng Xingze², Xu Mengchun², Jin Zhe², Fu Xianbin²

(1 State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, China; 2 Iron & Steel Research Institute of Ansteel Group, Anshan 114009, China)

Abstract: Research was conducted on the key metallurgical technologies in the smelting process of 1Cr13 stainless steel based on the ANS-OB process. Through thermodynamic and kinetic analysis of the process, the effects of steel tapping temperature, refining temperature, gas flow rate, smelting time, and reduction deoxidation on the smelting process were studied, and the key technical indicators for 1Cr13 stainless steel smelting were clarified. The results indicated that the tapping temperature of the converter and intermediate frequency furnace should be higher than 1 600 °C to ensure the subsequent refining temperature and reduce the temperature or composition mismatch caused by the adding alloys. The refining temperature range of ANS-OB process was 1 650 °C-1 700 °C, and its oxygen supply intensity gradually decreased from 0.8 m³/(t·min) to 0.4 m³/(t·min), while gradually increasing the argon supply intensity. Specifically, the flow ratio of O₂ to Ar was 1:(0.86-2.16), and the main oxygen blowing time was 30 minutes-34 minutes, reducing the C content in the molten steel to below 0.08%. Then, ferrosilicon was used for reduction deoxidation, with a dosage of 10 kg/t and an Ar supply intensity of 0.5 m³/(t·min) maintained to reduce the O content in the molten steel to below 0.003 0%. Finally, add alloys such as ferrosilicon and manganese iron to adjust the composition of the molten steel. Smelting was carried out according to the established process plan, and good industrial test results were achieved.

Key Words: ANS-OB; Stainless Steel; Thermodynamics; CO Partial Pressure; Temperature

1Cr13 不锈钢作为马氏体不锈钢的典型代表, 因其具备良好的耐蚀性、机械性能和加工性能, 在航空航天、机械制造、石油化工等诸多领域有着广泛应用^[1-4]。随着全球工业的迅猛发展, 各行业对 1Cr13 不锈钢质量和性能要求不断提高, 如何高效、稳定地生产高质量的 1Cr13 不锈钢成为冶金领域的研究重点^[5-7]。

世界上现有不锈钢厂主要采用“熔化炉+二次

精炼炉”两步法工艺路线^[8-11]。邢钢采用“铁水预处理→AOD→LF”工艺流程生产 1Cr13 不锈钢, 并将 AOD 炉操作由单渣法转变为双渣法, 减少了石灰、还原硅铁、萤石的加入量, 从而降低生产成本^[12-13]。泰钢采用高炉铁水→铁水预处理→TSR 炉冶炼→LF 炉精炼→CC 保护浇生产 400 系不锈钢^[14]。首钢冶炼 400 系列不锈钢工艺流程首先采用铁水罐喷吹脱磷技术, 以获得低磷铁水, 再将低磷铁水加入

基金项目: 辽宁省科技计划联合计划(2023 JH2/101800005)

作者简介: 李博洋(1991—), 男, 博士, 工程师; **E-mail:** 18841250870@163.com; **收稿日期:** 2025-03-05

AOD 进行冶炼^[15]。

在此背景下,鞍钢依托自主研发的 ANS-OB 装备,开发出 1Cr13 不锈钢生产线。该生产线通过转炉生产低磷铁水,并利用中频炉熔化铬铁共同制得粗钢水,再将粗钢水兑入 ANS-OB 进行冶炼,从而生产出 1Cr13 不锈钢。本研究聚焦于 ANS-OB 冶炼工艺,从粗钢成分及温度控制、OB 处理和调整成分角度,明确了影响 1Cr13 不锈钢冶炼的关键技术指标,制订了 1Cr13 冶炼工艺参数,为生产 1Cr13 不锈钢提供了有力的技术支持。

1 冶炼工艺流程

1Cr13 不锈钢化学成分及冶炼目标成分见表 1。其冶炼工艺流程采用“转炉+中频炉”双联法熔化原料以制备粗钢水,再将粗钢水装入 100 t 钢包运至 ANS-OB 冶炼 1Cr13 不锈钢,具体冶炼工艺路线如图 1 所示。

表 1 1Cr13 不锈钢化学成分及冶炼目标成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition and smelting target composition of 1Cr13 stainless steel %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
牌号成分	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	12.00~14.00
冶炼目标	0.10	0.50	0.50	0.0200	0.0200	13.00

2 冶炼工艺制订

2.1 粗钢水成分控制

为确保 ANS-OB 精炼效果,入炉粗钢水质量要求如下:

1) $w[\text{Cr}]$ 应控制在 13.0%~13.2%,即牌号成分的中上限。既防止精炼过程补充铬铁导致成分和温度不合,又减少铬铁使用量降低成本。

2) $w[\text{C}]$ 应控制在 1.0%~1.5%。确保 ANS-OB 脱碳过程的安全性和升温效果。

3) $w[\text{Si}]$ 应小于 0.3%。尽管 Si 可以作为升温剂,但大量 Si 氧化形成 SiO_2 ,增加石灰用量,进而提高渣量,从而影响精炼效果。

4) $w[\text{P}]$ 应小于 0.02%。由于 ANS-OB 不具备脱 P 能力,因此,必须严格控制粗钢水中 P 含量。

5) $w[\text{S}]$ 应小于 0.03%。尽管 ANS-OB 能够脱除 S,但 S 含量仍不宜过高。

因此,根据上诉要求,转炉和中频炉提供的 1Cr13 不锈钢冶炼原料成分及用量见表 2。

表 2 1Cr13 不锈钢冶炼原料成分及用量
Table 2 Composition and consumption of raw materials for smelting 1Cr13 stainless steel

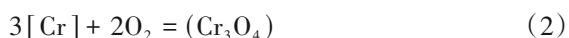
原料结构	成分(质量分数)/%						用量/t
	C	Si	Mn	P	S	Cr	
钢水	0.08	0.01	0.12	0.015	0.020	-	80
高碳铬铁	5.50	1.00	-	0.030	0.040	67.00	20
预测成分	1.16	0.21	0.10	0.018	0.024	13.40	100

2.2 ANS-OB 工艺

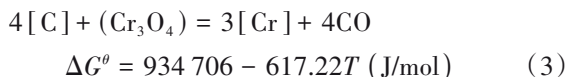
ANS-OB 工艺流程包括 OB 处理、调整成分、净化处理等关键步骤。为了实现各个阶段主要冶金任务,在生产 1Cr13 不锈钢过程中,主要关注以下几个方面。

1) 去碳保铬

ANS-OB 主要通过吹入 Ar-O_2 混合气体达到脱除钢液中 C 的目的。而对于不锈钢($w[\text{Cr}] > 9\%$)精炼过程,钢液中 C 和 Cr 会发生竞争性氧化反应,这就需要完成“去碳保铬”的任务。另外,在确保去碳保铬的前提下,铬氧化平衡的产物主要为 Cr_3O_4 。因此,反应器中发生的氧化反应如式(1)、式(2)。



将式(1)与式(2)相结合,即可得到去碳保铬的方法公式(3)。



根据非标准状态下吉布斯自由能公式 $\Delta G = \Delta G^\theta + RT \ln K^\theta$,当 $\Delta G = 0$ 时,反应平衡常数 K^θ 如式(4)。

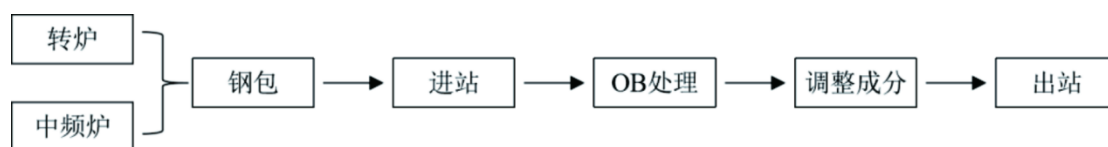


图 1 1Cr13 不锈钢冶炼工艺路线图

Fig. 1 1Cr13 stainless steel smelting process route map

$$K^\theta = \frac{p_{CO}^4 a_{Cr}^3}{a_{Cr_3O_4} a_C^4} = \frac{p_{CO}^4 f_{Cr}^3 w[Cr]^3}{a_{Cr_3O_4} f_C^4 w[C]^4} \quad (4)$$

式中, p_{CO} 为 CO 分压, Pa; a_C 、 a_{Cr} 分别为 C 和 Cr 活度; f_C 、 f_{Cr} 分别为 C 和 Cr 活度系数; $w[C]$ 、 $w[Cr]$ 分别为 C 和 Cr 质量分数, %; $a_{Cr_3O_4}$ 为 Cr_3O_4 活度。

采用 Wagner 模型计算钢中 C 和 Cr 活度系数如式(5)。

$$\lg f_i = \sum e_i^j w[j] \quad (5)$$

式中, e_i^j 为组元 i 对组元 j 的相互作用系数, 1 873 K 下不锈钢中各元素相互作用系数^[16-17]见表 3。

表 3 1 873 K 下 1Cr13 不锈钢中各元素相互作用系数

Table 3 Interaction coefficients of various elements in 1Cr13 stainless steel at 1873 K

e_i^j	C	Si	Mn	P	S	Cr
C	0.14	0.08	-0.012	0.051	0.046	-0.024
Cr	-0.12	-0.0003	-	-0.053	-0.02	-0.0003

将表 2 中粗钢水预测成分和表 3 中各元素相互作用系数代入公式(5), 求得 $f_C = 0.72$, $f_{Cr} = 0.72$ 。又由于强氧化条件, 渣中 Cr_3O_4 接近于饱和状态, 所以, 取 $a_{Cr_3O_4} = 1$ 。将上述结果代入公式(4)中。当 $p_{CO} = 1.01 \times 10^5$ Pa 时, 计算不同温度下 1Cr13 不锈钢中 C 和 Cr 平衡曲线, 结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 当 Cr 含量一定时, 随着温度升高, 平衡状态下 C 含量越低。若想达到 $w[Cr] = 13\%$ 、 $w[C] = 0.10\%$ 冶炼目标, 所需冶炼温度为 1 650~1 700 °C。再根据公式(4)分别绘制温度为 1 650、1 700 °C 下 1Cr13 不锈钢冶炼过程中 CO 分压对钢中 C 和 Cr 平衡的影响, 结果如图 3

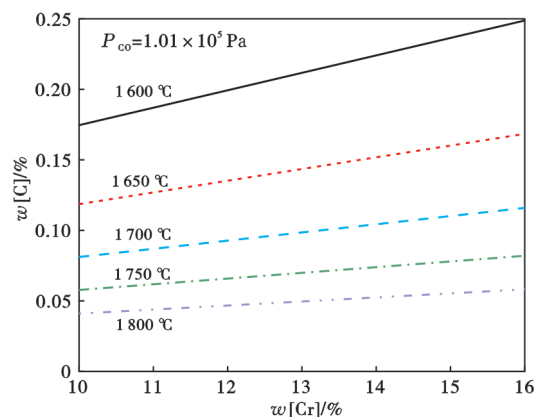


图 2 1Cr13 不锈钢冶炼温度对钢中 C 和 Cr 平衡的影响
Fig. 2 Effect of smelting temperature on the equilibrium of C and Cr in 1Cr13 stainless Steel

所示。

从图 3 可以看出, 当 Cr 含量一定时, 随着 p_{CO} 降低, 平衡状态下 C 含量越低。此外, 后续合金化处理将导致钢水中 $w[C]$ 增加 0.03%。因此, 冶炼中设定的目标 C 含量由 0.10% 下调至 0.07%。所以, 在 $w[Cr] = 13\%$ 、 $w[C] = 0.07\%$ 目标条件下, 当 $T = 1 700$ °C 时, $p_{CO} = 0.70 \times 10^5$ Pa; 当 $T = 1 650$ °C 时, $p_{CO} = 0.48 \times 10^5$ Pa。基于以上分析, ANS-OB 工艺中精炼温度为 1 650~1 700 °C, 且 O_2 与 Ar 的流量比应控制在 1:(0.86~2.16)。

2) 温度控制

为了达到去碳保铬的反应温度, 因此, 需要对入炉钢水温度和精炼过程元素升温进行控制。表 4 展示了 1Cr13 不锈钢中各元素氧化升温效果。

根据表 1、表 2 和表 4 计算钢中元素氧化放热量, 如式(6)。

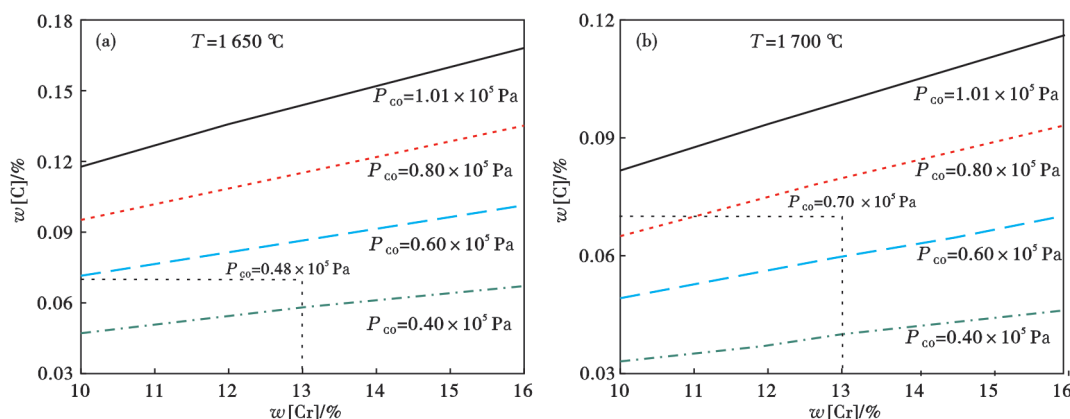


图 3 1Cr13 不锈钢冶炼过程中 CO 分压对钢中 C 和 Cr 平衡的影响: (a) 1 650 °C, (b) 1 700 °C

Fig. 3 Effect of CO partial pressure on the equilibrium of C and Cr in the smelting process of 1Cr13 stainless Steel : (a) 1 650 °C, (b) 1 700 °C

表 4 1Cr13 不锈钢中各元素氧化升温效果

Table 4 Oxidation and heating-up effect of each element in 1Cr13 stainless steel

元素	氧化 0.1% 含量升高温度/℃
C	12
Si	27
Cr	13

$$T = \Sigma(\Delta w [W] \Delta T) = 12 \times (1.16 - 0.07) + 27 \times (0.21 - 0.01) + 13 \times (13.4 - 13.0) = 237 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6)$$

经计算得出,粗钢水理论升温潜力为 237 ℃。根据图 4 所示 1Cr13 不锈钢冶炼过程中 CO 分压与精炼温度关系曲线可知,当 $p_{\text{CO}}=(0.48\sim 0.70)\times 10^5 \text{ Pa}$ 时,初始精炼温度应控制在 1 523~1 567 ℃。对比前文所述 ANS-OB 工艺要求的 1 650~1 700 ℃精炼温度参数,最大温差为 177 ℃,该数值仍低于粗钢水理论升温潜力值。由此可确定精炼初始温度可以设定为 1 523 ℃,此温度设定既满足工艺要求,又能充分发挥钢水自身的升温能力。考虑到出钢、运输操作会导致近 50 ℃的温降,故转炉和中频炉出钢温度不低于 1 573 ℃。所以,为确保转炉和中频炉出钢温度满足 ANS-OB 精炼温度要求,则转炉和中频炉出钢温度不低于 1 573 ℃。

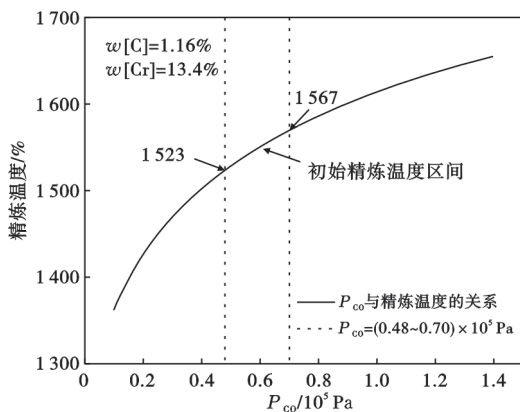


图 4 1Cr13 不锈钢冶炼过程中 CO 分压与精炼温度的关系
Fig. 4 Relationship between CO partial pressure and refining temperature in the smelting process of 1Cr13 stainless steel

3) 供氧制度

ANS-OB 吹 Ar-O₂ 混合气体进行脱碳的时间,依据经验公式如下^[18]:

$$t_{\text{min}} = 6.78 \ln(33.3 \Delta w [C]) \quad (7)$$

式中, t_{min} 为脱碳所用最短时间; $\Delta w [C]$ 为脱碳量百分数。

根据式(7)绘制了 1Cr13 不锈钢冶炼过程中脱

碳量与脱碳时间的关系图,如图 5 所示。

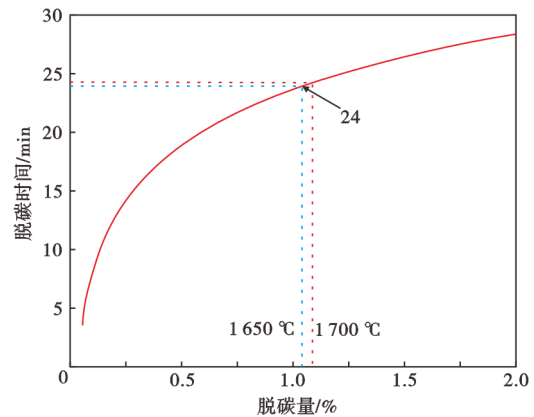


图 5 1Cr13 不锈钢冶炼过程中脱碳量与脱碳时间的关系
Fig. 5 Relationship between decarburization amount and decarburization time in the smelting process of 1Cr13 stainless Steel

从图 5 可以看出,随着脱碳量的增加,脱碳时间的延长趋势逐渐趋于平缓。在 $p_{\text{CO}}=1.01\times 10^5 \text{ Pa}$, 脱碳温度 1 650~1 700 ℃时,平衡状态下 $w [C]$ 为 0.10%~0.14%, 相应的脱碳量为 1.02%~1.06%, 所需脱碳时间为 24 min 左右。而总脱碳时间为 24.4 min, 表明在脱碳前中期,适宜采用小流量 Ar 与大流量 O₂ 混合的方式;而在脱碳后期,则应采用大流量 Ar 降低 CO 分压,并借助残余 O₂ 进行脱碳。

根据上文中总脱碳时间为 24.4 min, 计算供氧强度如式(8)。

$$Q = \frac{\Delta w [C] V_m}{M_c t} = \frac{1.09\% \times 22.4}{12 \times 24.4} = 0.83 \quad (8)$$

式中, Q 为供氧强度, $\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$; $\Delta w [C]$ 为反应前后碳含量变化, %; V_m 为气体摩尔量, L/mol ; M_c 为 C 的相对原子质量, g/mol ; t 为反应时间, min 。

4) 还原脱氧

由于钢水中 Cr 含量远高于 C 含量,因此,去碳保铬操作中 Cr 并不是绝对不氧化,仍有部分 Cr 被氧化进入渣中。当钢液中 C 含量脱至目标后,还需要进行还原操作,通过加入硅铁还原被氧化的 Cr, 反应式如下^[19-20]:

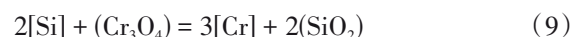


图 6 展示了 1Cr13 不锈钢冶炼还原时间对渣中 Cr₃O₄ 含量的影响。结果表明,在冶炼温度为 1 670 ℃下,渣中 Cr₃O₄ 被迅速还原,并在 4.5 min 时达到平衡,说明还原时间超过 4.5 min 可以还原大部

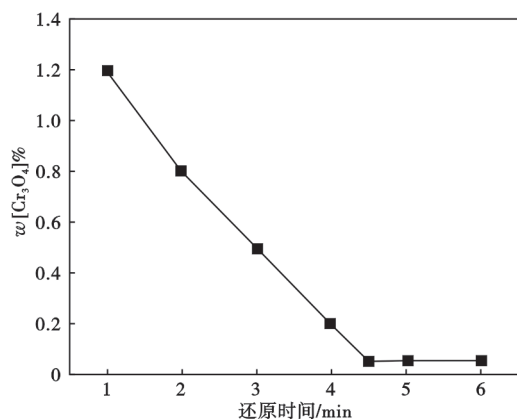


图6 1Cr13不锈钢冶炼还原时间对渣中Cr₃O₄含量的影响
Fig. 6 Effect of reduction time on Cr₃O₄ content in molten slag of 1Cr13 stainless steel

分Cr₃O₄,达到降低Cr损失的目的。

综上所述,ANS-OB冶炼工艺步骤如下:

第一阶段:采用O₂:Ar = 1:1流量比例进行供气。供氧强度为0.8 m³/(t·min),持续时间为16 min,目的是将钢水中C含量降至0.3%以下,同时,确保钢水精炼温度达到约1 650 °C。

第二阶段:调整O₂:Ar = 1:2.5。供氧强度由0.8 m³/(t·min)逐渐调整为0.4 m³/(t·min),持续时间为16 min,以进一步将钢水中C含量降低至0.07%左右,并使钢水精炼温度提升至约1 700 °C。

第三阶段:仅通入Ar,供气强度维持在0.5 m³/(t·min),持续时间为10 min,并加入硅铁进行还原脱氧,加入量为10 kg/t,目标是将钢水中O含量降至0.003 0%以下。与此同时,加入石灰、精炼渣等造渣材料,碱度为2.5~3.0。

参考文献

- [1] 陈 炜,王 红,于广义,等. 1Cr13不锈钢叶轮脆性原因分析[J]. 热处理, 2017, 32(2): 48-50.
- [2] 金洋帆,臧其玉,张 拓,等. Cr13系铸造马氏体不锈钢铌和碳的合理配比关系[J]. 钢铁, 2019, 54(3): 87-95.
- [3] Liu X Y, Zhou G T, Shen Y Y, et al. Numerical investigation on the electroslag remelting of high carbon martensitic stainless steels [J]. Metals, 2023, 13(3): 482-506.
- [4] Gao B, Xu T, Wang L, et al. Achieving a superior combination of tensile properties and corrosion resistance in AISI420 martensitic stainless steel by low-temperature tempering [J]. Corrosion Science, 2023, 225: 111551.
- [5] 兰博文. 1Cr13马氏体不锈钢海洋环境使役损伤行为研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.
- [6] Liu Y R, Ye D, Yong Q L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel.

第四阶段:加入硅铁、锰铁等合金调整钢水成分,静吹Ar 15~20 min后出站,结束ANS-OB冶炼。

3 工业试验

按照设计工艺完成2炉1Cr13不锈钢生产,结果见表5。成品成分控制稳定,满足产品要求。

表5 1Cr13不锈钢成品成分(质量分数)

							%	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	N	
0.11	0.48	0.51	0.015	0.010	13.02	0.03	0.020	
0.11	0.51	0.52	0.014	0.011	12.95	0.03	0.018	

4 结论

ANS-OB冶炼工艺从粗钢成分及温度控制、OB处理和调整成分角度研究了影响1Cr13不锈钢冶炼的关键技术指标。

1)粗钢水中w[Cr]控制在牌号成分含量的中上限,w[C]不低于1.0%。转炉和中频炉出钢温度不低于1 573 °C,保证后续精炼温度,减少添加合金导致温度或成分不合。

2)ANS-OB工艺精炼温度范围为1 650~1 700 °C,其供氧强度由0.8 m³/(t·min)逐渐降低至0.4 m³/(t·min),并逐渐提高供氩强度,具体为O₂与Ar的流量比为1:(0.86~2.16),主吹氧时长约为32 min;

3)采用硅铁还原渣中Cr₃O₄,加入量为10 kg/t。维持炉渣碱度为2.5~3.0,保证炉渣的精炼效果。

Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 18(11): 60-66.

- [7] Derazkola H A, Garcia E, Murillo-Marrodán A, et al. The effect of temperature and strain rate on the mechanical properties and microstructure of super Cr13 martensitic stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3464-3476.
- [8] Fritz E, Steins J. New technologies for the production of stainless steel[J]. Metallurgical Plant and Technology International, 1998, 22(4): 74-76.
- [9] Fritz E. Stainless steel production technology trends, developments and new projects [J]. Iron and Steel, 2003, 100 (4) : 377-386.
- [10] Choulet R J, Masterson I E. Secondary steelmaking in stainless steel refining[J]. Iron and steelmaker, 1993, 20(5): 45-54
- [11] 杜 鑫,龚 伟,姜周华,等. 转炉+AOD两步法治炼不锈钢

- 物热平衡模型开发[J]. 中国冶金, 2023, 33(8): 84-91.
- [12] 李广斌, 代书华, 吴广海, 等. AOD 炉采用双渣工艺冶炼 1Cr13 钢的实践[J]. 钢铁研究, 2016, 44(2): 53-55.
- [13] 李广斌, 赵迎凯, 吴广海, 等. 邢钢低碳 400 系铁素体不锈钢 AOD 控氮工艺实践[J]. 特殊钢, 2020, 41(1): 24-27.
- [14] 张 爽. 泰山钢铁马氏体不锈钢系列产品的开发[J]. 山东冶金, 2022, 44(5): 18-20+26.
- [15] 黄 云, 侯 成, 郭 戎. 铁水罐喷吹脱磷在 400 系不锈钢 70 t AOD 一步法冶炼工艺中的应用[J]. 特殊钢, 2017, 38(3): 44-46.
- [16] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [17] Park J H. Thermodynamic investigation on the formation of inclusions containing $MgAl_2O_4$ spinel during 16Cr - 14Ni austenitic stainless steel manufacturing processes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 472(1-2): 43-51.
- [18] 张乐辰. 高品质 2Cr13 不锈钢关键冶金技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [19] Suito H, Inoue R. Thermodynamics on control of inclusions composition in ultra-clean steels [J]. ISIJ International, 1996, 36(5): 528-536.
- [20] Nurmi S, Louhenkilpi S, Holappa L. Optimization of Intensified Silicon Deoxidation [J]. Steel Research International, 2013, 84(4): 323-327.