



不同炉料条件下 150 t AOD 冶炼 430 不锈钢 物热平衡模拟

卢小辉¹, 康从鹏², 陈洪智², 徐永斌²

(1 中天钢铁集团(南通)有限公司炼钢厂, 南通 226299; 2 中冶南方工程技术有限公司炼钢分公司, 武汉 430223)

摘要:为探究不同炉料条件对 AOD 冶炼不锈钢过程的影响,以 150 t AOD 炉冶炼 430 不锈钢为例,基于实际的生产流程,构建了 AOD 精炼不锈钢过程的物料和热量平衡模拟系统。通过模拟计算,对不同炉料条件下的炉温变化以及相关的技术经济指标进行了深入的比较和分析。研究表明,采用脱磷铁水+固态铬铁的人炉原料条件会造成炉温偏低,在还原前期需加入大量硅铁合金补热以满足出钢要求。该工艺条件下,硅铁和石灰消耗量分别达到 39.3、97.7 kg/t,高碳铬铁持续加入时间为 12 min 左右,加料速率为 4 t/min,此时,最大供氧强度为 400 m³/min。通过协调供氧量与加料速率之间的关系,以实现炉内温度的相对稳定;采用脱磷铁水+高铬铁水为入炉炉料条件下的工艺过程中,硅铁和石灰消耗量分别为 25.7、58.9 kg/t,该工艺过程会产生热量富余,通过加入废钢作为冷却剂来控制炉温并满足出钢温度要求,该条件下吨钢废钢消耗量为 169.1 kg,废钢加入量占比为 15.1%。模型计算过程可以根据入炉原料条件调节并优化炉料配比,可为 AOD 生产不锈钢提供理论与生产指导。

关键词:430 不锈钢; 冶炼工艺; 物料平衡; 热量平衡; AOD 精炼

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00175 **中图分类号:**TF701.2

Simulation of Material and Heat Balance of 150 t AOD Melting 430 Stainless Steel under Different Charge Conditions

Lu Xiaohui¹, Kang Congpeng², Chen Hongzhi², Xu Yongbin²

(1 Steelmaking Plant of Zenith Steel (Nantong) Group Company Limited, Nantong 226299, China;

2 Steelmaking Branch of WISDRI Engineering Research Incorporation Limited, Wuhan 430223, China)

Abstract: In order to explore the influence of different charge conditions on the process of AOD smelting stainless steel, taking 430 stainless steel smelting in 150 t AOD furnace as an example, based on the actual production process, a material and heat balance simulation system of AOD refining stainless steel process was constructed. Through simulation calculation, the furnace temperature change under different charge conditions and related technical and economic indexes are deeply compared and analyzed. The results show that the furnace temperature will be low by using the raw material condition of dephosphorized molten iron and solid ferrochromium, and a large amount of ferrosilicon alloy should be added in the early stage of reduction to meet the requirements of steel tapping. Under this process condition, the consumption of ferrosilicon and lime reached 39.3 kg/t and 97.7 kg/t respectively, the continuous addition time of high carbon ferrochromium was about 12 min, the feeding rate was 4 t/min, and the maximum oxygen supply intensity at this time was 400 m³·min⁻¹. By coordinating the relationship between oxygen supply and feeding rate, the temperature in the furnace was relatively stable; In the process of using dephosphorized molten iron + high chromium molten iron as furnace charge, the consumption of ferrosilicon and lime was 25.7 kg/t and 58.9 kg/t respectively. This process would generate heat surplus. By adding scrap steel as coolant to control the furnace temperature and meet the tapping temperature requirements, under this condition, the consumption of scrap steel per ton of steel was 169.1 kg, and the proportion of scrap steel added was 15.1%. The model calculation process can adjust and optimize the charge ratio according to the conditions of raw materials entering the furnace, which can provide theoretical and production guidance for AOD production of stainless steel.

Key Words: 430 Stainless Steel; Metallurgical Processes; Mass Balance; Heat Balance; AOD Refining

400 系不锈钢,作为一种无镍或低镍的铁素体不锈钢,因其成本效益高而受到广泛关注。作为全球最大的不锈钢生产和消费国,中国对 400 系不锈钢的需求持续增长^[1]。从 2012 年至 2022 年,400 系不锈钢的产量从 320 万吨增加到 560 万吨,增幅超

过 75%^[2]。

有关工艺提到,利用合金熔化炉熔化高碳铬铁等合金,并通过转炉进行脱磷,再将混合后的不锈钢母液兑入 AOD 炉进行精炼脱碳,这是近年来国内流行的两步法不锈钢生产工艺流程^[3]。这说明高碳

作者简介: 卢小辉(1978—),男,本科,高级工程师; **E-mail:** luxiaohui918@126.com; **收稿日期:** 2024-07-12

通信作者: 康从鹏(1993—),男,博士,工程师; **E-mail:** 03122@wisdri.com

铬铁作为原料在 AOD 冶炼中扮演着重要角色。许多学者针对 AOD 冶炼不锈钢工艺过程和物料及热量平衡过程进行了相关研究,王海江等^[4]建立了 120 t AOD 全铁水冶炼 400 系不锈钢冶金模型,该模型可精确计算出炉料和发热剂用量,并可以分析影响热量收支的关键因素;叶凡新等^[5]针对 60 t AOD 全铁水精炼 400 系不锈钢进行了热补偿工艺实践研究,发现由于向炉内添加大量合金和渣料,造成炉内热量严重不足;陈圣鹏等^[6]发现采用电弧炉、脱硅转炉+AOD 冶炼 400 系不锈钢时,AOD 炉内会产生热量富足,需添加废钢降温。然而,以上研究者均对全铁水加入固态铬铁或液态铬铁水中的一种原料条件进行了 AOD 冶炼 400 系不锈钢阶段的工艺或模拟工作,而未对两种原料模式下冶炼同一不锈钢钢种带来的工艺差别进行比较。

脱磷铁水+固态铬铁和脱磷铁水+铬铁水两种原料条件下,AOD 冶炼 400 系不锈钢的工艺及物料平衡、热平衡模拟需要综合考虑原料选择、热力学平衡、物料配比等多个方面。本文以 AOD 冶炼 430 不锈钢为例,通过较为精确、合理的计算和模拟,可以有效地控制冶炼过程中的热量平衡,从而提高生产效率和产品质量。同时,合理控制原料的加入量和比例,对于保持热平衡和降低成本也至关重要。

1 冶炼工艺流程及炉料条件概述

1.1 工艺流程

430 不锈钢冶炼工艺流程如下:

(1) 工艺路线一以高炉铁水经转炉处理后脱磷铁水为主要原料,该脱磷铁水进入 AOD 炉,在炉内分批次加入固态合金(主要以高碳铬铁为主)以调节成分。

(2) 工艺路线二将脱磷铁水+中频炉熔化高碳铬铁后获得的高温高铬铁水兑入 AOD 炉,冶炼过程中在炉内补加合金以调节成分。

上述工艺中铁水均由高炉提供,脱磷脱硅处理后的高炉铁水加入 AOD 炉进行冶炼,依据产品要求,分阶段加入高碳铬铁等合金。固态合金通过高位料仓加入 AOD 炉。出钢后依钢种需求进入 LF 炉或 VOD 炉中进行精炼后上连铸机浇注。其中 AOD 炉主要参数在表 1 中给出。

AOD 冶炼 430 不锈钢的过程中,脱碳阶段根据钢液的碳含量和温度被细分为六个阶段(DEC1~DEC6),该六个阶段的终点 $w[C]$ 分别为 1.2%、0.5%、0.35%、0.20%、0.10% 和 0.08% 左右。为

表 1 AOD 炉主要参数

Table 1 Main parameters of AOD furnace

公称容量/t	最大出钢量/t	顶枪氧气流量/ $(m^3 \cdot min^{-1})$	侧枪氧气流量/ $(m^3 \cdot min^{-1})$	氧枪马赫数	风口数/个	炉容比/ $(m^3 \cdot t^{-1})$
150	165	~240	~160	2	8	~0.62

了优化冶炼周期并提高脱碳的效率,在初始的高碳阶段,采用顶侧吹相结合的复吹工艺,这一工艺应用于 DEC1 至 DEC3 阶段。当钢液进入低碳阶段,便停止顶吹供氧,仅采用侧吹供氧,并实时根据钢液的碳含量和温度变化,调整侧吹中氧气与氮气的混合比例。这一调整策略根据气体混合比例的不同,将脱碳过程的后期划分为 DEC4、DEC5 和 DEC6 三个子阶段。根据钢种对氮含量的要求,在氧化后期会采用氩气替代氮气的方式控制钢中的氮含量,以满足成分要求^[7-9]。

在进入还原期后,若由于加入大量的合金和渣料使炉内温度降低,此时可采取在还原前期适当吹氧的措施将炉内温度升高。氧化期渣碱度在 1.8~2.0,还原期通过补加石灰和轻烧白云石使熔渣碱度提高至 2.0~2.5。炉内温度不宜长时间超过 1 710 °C,当温度过高时,需要添加废钢降温。还原期结束后,可进行合金化微调,根据需要添加不同的合金,调整钢液的化学成分和温度,以满足特定的产品标准。最终,将合格的 AOD 钢液倒入钢包,然后用行车吊运至 LF 炉进行深脱氧,进一步提高钢液的质量。

1.2 炉料条件

表 2 和表 3 给出了脱磷铁水、高铬铁水(70% 脱磷铁水+30% 高碳铬铁水)、高碳铬铁、锰铁和硅铁等入炉原料和合金成分表。其中脱磷铁水入炉温度为 1 540 °C,高铬铁水入炉温度为 1 647 °C。高碳铬铁中铬收得率为 95%,锰铁中锰收得率为 98%,硅铁中硅收得率为 60%,其余损失部分均氧化成渣。经 AOD 炉精炼后,所得目标钢种成分见表 4。表 5 给出了两种工艺路线下 AOD 冶炼 430 不锈钢的精炼渣终点成分。

表 2 430 不锈钢入炉原料成分及温度

Table 2 Raw material composition and temperature of 430 stainless steel entering furnace

原料	成分(质量分数)/%						温度/°C
	C	Si	Mn	P	S	Cr	
脱磷铁水	2.80	0.10	0.100	0.035	0.020	-	1 540
高铬铁水	4.06	0.37	0.145	0.035	0.020	15.60	1 647

表 3 430 不锈钢入炉铁合金成分(质量分数)

Table 3 Ferro alloy composition of 430 stainless steel in furnace

铁合金	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
高碳铬铁	7.00	1.00	0.25	0.035	0.020	52.00	Bal.
锰铁	0.10	2.50	80.00	0.330	0.030	-	Bal.
硅铁	0.02	74.00	0.50	0.040	0.020	-	Bal.

表 4 430 不锈钢目标成分(质量分数)

Table 4 430 stainless steel target composition range %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
标准范围	≤0.12	≤0.75	≤1.0	≤0.030	≤0.030	16.00~18.00	≤0.60
内控成分	0.07~0.10	0.35~0.60	≤1.0	≤0.025	≤0.025	16.00~16.50	-
目标成分	0.08	0.45	0.85	0.020	0.020	16.30	-

表 5 两种工艺路线下 430 不锈钢精炼渣终点成分(质量分数)

Table 5 Final composition of 430 stainless steel refining slag under two process routes

方案	CaO	SiO ₂	MnO	CaF ₂	MgO	FeO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
工艺路线一	56.16	27.80	0.63	9.32	3.27	1.64	0.78	0.34
工艺路线二	52.98	25.59	0.85	9.78	5.08	2.90	0.66	0.36

2 物料平衡和热量平衡模型建立

为了精确、合理地核算和模拟 AOD 冶炼过程中的热量平衡,进而优化物料的配比并提升生产效率,可以遵循以下步骤:首先,必须构建一个覆盖整个 AOD 冶炼流程的数学模型。该模型应综合考虑体系的物理和化学属性,包括质量平衡和热平衡计算,同时纳入添加造渣材料、废钢、合金等工艺操作对系统的影响^[10]。此外,模型还应纳入精炼过程中钢液和炉渣质量变化等关键参数。

AOD 冶炼过程中建立的物料和热量平衡模型,是依据冶金学的基础理论、质量守恒定律和能量守恒定律,同时考虑实际生产过程中的具体情况和合理推断进行构建的^[3]。

AOD 炉物料平衡模型涉及物料收入项和物料支出项,收入项主要包括脱磷铁水、高铬铁水、石灰、白云石、萤石、氧气、氮气、氩气、高碳铬铁、锰铁、硅铁等;支出项主要包括出炉钢液、炉渣、高温烟气和烟尘等。

AOD 炉热量平衡模型中涉及热量收入项和热量支出项,热量收入项主要包括入炉脱磷铁水物理热,高铬铁水物理热、元素氧化热,成渣反应热等;热量支出项主要包括出炉钢液物理热,炉渣物理热

和高温烟物物理热,烟尘物理热及其他热损失。

熔炼期间可能发生的化学反应见表 6^[11],主要包含氧化反应和成渣反应两类。从化学反应顺序看,硅氧反应最先进行,随后再进入脱碳反应阶段。在计算过程中假定碳氧化产物 CO 和 CO₂ 含量比为 9:1^[11],氧气利用率随碳含量降低而降低。富余氧气分配率与氧化反应(主要包括 Fe、Cr 和 Mn 等)的吉布斯自由能成正比^[12]。根据冶炼工艺过程,图 1 中给出了物料平衡和热量平衡计算流程。

表 6 430 不锈钢冶炼过程所涉及的化学反应

Table 6 The chemical reactions involved in the melting process of 430 stainless steel

项目	组元	化学反应	ΔH/(kJ·kg ⁻¹)
氧化反应	C	[C]+1/2{O ₂ }={CO}	-11 639
		[C]+{O ₂ }={CO ₂ }	-34 834
	Fe	[Fe]+1/2{O ₂ }={FeO}	-4 250
	Si	[Si]+{O ₂ }={SiO ₂ }	-29 202
	Cr	2[Cr]+3/2{O ₂ }={Cr ₂ O ₃ }	-10 192
成渣反应	Mn	[Mn]+1/2{O ₂ }={MnO}	-6 594
		SiO ₂	(SiO ₂)+2(CaO)=2CaO·SiO ₂

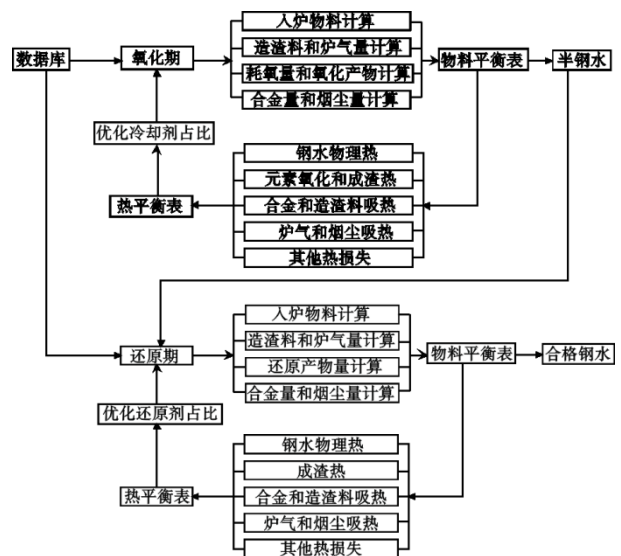


图 1 430 不锈钢冶炼过程的物料平衡和热量平衡计算模型
Fig. 1 Calculation model of material balance and heat balance in 430 stainless steel melting process

3 结果分析

表 7 给出了两种工艺路线下的物料平衡明细表,收入项与支出项总量误差较小,分别为 0.28% 和 0.34%。相比工艺路线二,工艺路线一中,由于脱磷铁水中不含铬元素,故收入项中高碳铬铁加入量达到 49 t,占比达到 27.8%。按照实际顶枪与侧枪最大供氧强度 400 m³/min 计算,高碳铬铁持续加入时

表 7 两种工艺路线下冶炼 430 不锈钢总物料平衡表
Table 7 Total material balance table of melting 430 stainless steel under two process routes

收入项					支出项				
工艺路线一		工艺路线二			工艺路线一		工艺路线二		
项目	质量/kg	占比/%	质量/kg	占比/%	项目	质量/kg	占比/%	质量/kg	占比/%
钢液	105 000	59.4	112 500	68.6	钢液	148 541.58	84.2	146 600.13	89.6
石灰	14 847.8	8.4	8 765.0	5.3	炉渣	27 781.17	15.8	17 055.62	10.4
萤石	2 418.2	1.4	1 580.3	1.0	炉气	22 774.35	12.9	19 844.95	12.1
轻烧白云石	2 250.0	1.3	2 250.0	1.4	烟尘	901.41	0.5	528.85	0.3
氧气	14 730.1	8.3	11 557.7	7.0					
氩气	1 754.3	1.0	1 754.3	1.1					
氮气	3 443.7	1.9	2 938.2	1.8					
高碳铬铁	49 190.3	27.8	13 664.0	8.3					
锰铁	1 096.4	0.6	1 092.4	0.7					
硅铁	5 842.2	3.3	3 768.5	2.3					
冷却废钢	-	-	24 789.5	15.1					
合计	200 572.98	100.0	184 659.80	100.0	合计	199 998.51	100.0	184 029.54	100.0

间在 12 min 左右,即加料速度在 4 t/min 左右。若加料速度过快,合金熔化后 Si 和 C 的氧化温升速率难以匹配合金加入时的温降速率,最终使炉内温度下降速率过快;若加料速度较慢,则使冶炼周期过长^[13]。

为了维持熔炼期间的碱度在目标范围内,通常石灰与硅铁合金使用量成正比。造渣料中添加白云石可以提高 MgO 含量,提高炉衬寿命,一般炉渣中 MgO 含量在 5% 左右^[14]。萤石用量一般取渣量的 10%,用以降低炉渣熔点,促进炉渣的流动性,并在侧吹气体的作用下改善反应动力学,从而提高还原期金属回收率。工艺路线一中硅铁消耗量较大,主要是通过硅氧反应放热弥补热量缺口。相比之下,由于工艺路线二热量富余,使得硅铁消耗量较少,为了控制炉内温度过高,还通过加入约 15.1% 的冷却废钢使氧化期温度维持在一个相对稳定的水平。两种工艺条件下的炉渣量占比分别为 15.8% 和 10.4%,由此可见,采用高铬铁水作为主原料时降低炉渣使用量明显。为了更加直观比较两种工艺路线下气体、合金料、冷却剂、还原剂和渣料的用量,表 8 给出了相应的技术经济指标。

图 2 给出了两种工艺路线条件下炉内温度与 C、Si、Mn 和 Cr 等成分质量分数的变化曲线。在 AOD 冶炼过程中,始终存在着 C、Si、Cr 和 Mn 的竞争性氧化。在工艺路线一中,入炉的脱磷铁水硅含量较低(约为 0.1%),吹炼初期便开始进入碳的氧化反应过程;而在工艺路线二中,高铬铁水中硅

表 8 两种工艺条件下冶炼 430 不锈钢技术经济指标
Table 8 Technical and economic indexes of smelting 430 stainless steel under two process conditions

类别	项目	工艺路线一	工艺路线二
入炉原料	脱磷铁水/高铬铁水	707.1	767.4
	氧气/(m ³ ·t ⁻¹)	57.6	51.4
	氮气/(m ³ ·t ⁻¹)	18.5	16.0
气体	氩气/(m ³ ·t ⁻¹)	6.6	6.7
	高碳铬铁/(kg·t ⁻¹)	331.2	101.6
合金料	锰铁/(kg·t ⁻¹)	7.4	7.5
	冷却剂	废钢/(kg·t ⁻¹)	-
还原剂	硅铁/(kg·t ⁻¹)	39.3	25.7
	石灰/(kg·t ⁻¹)	97.7	58.9
	白云石/(kg·t ⁻¹)	15.2	15.3
	萤石/(kg·t ⁻¹)	12.8	10.8
渣料	出钢量/t	148.5	146.6

含量较高,在氧化前期主要发生硅的氧化反应,而后主要以碳的氧化反应为主。为了避免锰元素过早氧化,两种工艺条件下的锰合金均在还原期加入。

经热量平衡计算得到的温度曲线可以看出,工艺路线一中的炉内温度整体明显低于工艺路线二。发生该种现象的原因在于来自四个方面:首先,工艺路线一采用温度较低的脱磷铁水入炉,导致起始温度低;其次,脱磷铁水中硅含量较低,氧化前期硅氧反应放热有限;此外,脱磷铁水中碳含量明显低于高铬铁水,导致氧化期碳氧反应放热量明显不足;最后,为了达到出钢成分标准,工艺路线一中添加了大量的高碳铬铁合金,且该种合金熔化所需的热量要大于合金熔化后的碳、硅放热量,导致温度

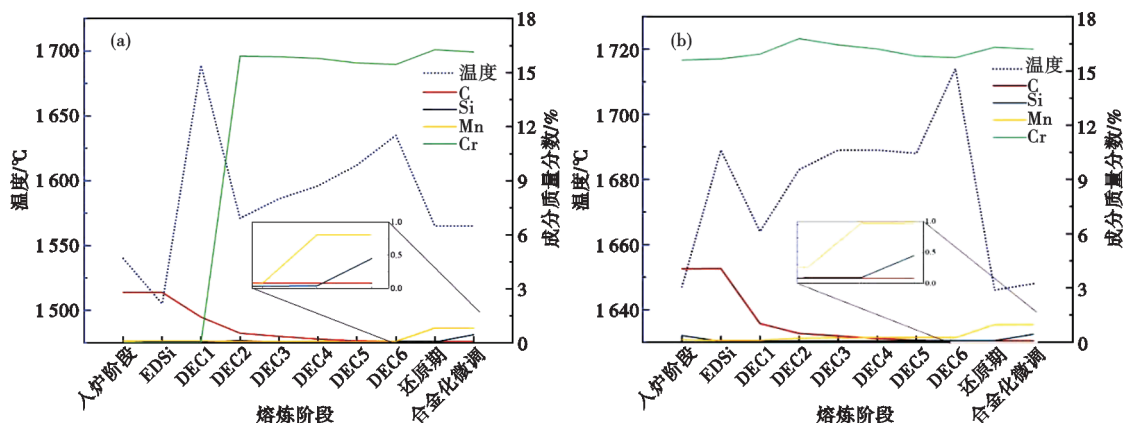


图 2 两种工艺路线下冶炼 430 不锈钢炉内温度及成分(C、Si、Mn、Cr)质量分数变化:(a)工艺路线一,(b)工艺路线二

Fig. 2 Variation of temperature and composition (C, Si, Mn, Cr) mass fraction in furnace for melting 430 stainless steel under two process routes : (a)process route 1, (b)process route 2

下降。以上原因共同促使工艺路线一中的炉内温度偏低,恶化去碳保铬效果,这种影响贯穿了整个冶炼过程^[15-16]。在实际生产中,由于还原期加入大量合金和造渣剂,使还原期温度下降。此时,往往采用向炉内加入硅合金并吹侧氧的方式,使还原前期发生硅氧反应放热,达到提高炉内温度以满足出钢温度要求的目的。

在工艺路线二中,受入炉高铬铁水温度、C和Si含量高的影响,在氧化初期炉内温度就可达到1680℃以上。伴随着脱碳反应的持续进行,炉内温度将持续升高。虽然氧化期会分阶段加入石灰和白云石等渣料,但降温作用有限。此时,通常向炉内加入废钢进行冷却。废钢可以选用同类型不锈钢,也可采用杂质含量低的低碳普钢。在本工艺路线中,废钢加入量占收入项比例为15.1%,废钢加入时间分布在DEC2~DEC5阶段。在DEC6阶段,为了防止随后还原期温度过低,该阶段即使炉内温度短暂超过1710℃也无需添加冷却剂。

参考文献

- [1] 李天宝. 现代铁素体不锈钢的性能及应用[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2015.
- [2] 赵萍. 400系不锈钢推广前景看好[N]. 中国冶金报, 2023.
- [3] 杜鑫, 龚伟, 姜周华, 等. 转炉+AOD两步法冶炼不锈钢物热平衡模型开发[J]. 中国冶金, 2023, 33(8): 84-91.
- [4] 王海江, 李实. 120 t AOD全铁水冶炼400系不锈钢数学模型的应用[J]. 河北冶金, 2019(4): 48-52+67.
- [5] 叶凡新, 冯文甫, 郭志彬, 等. 60 t AOD全铁水精炼400系不锈钢热补偿技术的工艺实践[J]. 特殊钢, 2016, 37(6): 44-46.
- [6] 陈圣鹏. 新原料条件下不锈钢冶炼工艺及物料平衡、热平衡模

4 结论

(1)使用脱磷铁水和高铬铁水作为AOD炉的原料时,硅铁合金消耗量分别为39.3、25.7 kg/t,石灰消耗量分别为97.7、58.9 kg/t,炉渣量占比分别为15.8%和10.4%。当采用脱磷铁水作为入炉原料时,可通过提升脱磷铁水的入炉温度以减少在还原阶段对硅铁合金的需求。这样不仅可以降低渣的生成量,还能有效减少在冶炼过程中产生的热量损失。

(2)以脱磷铁水为原料时,在脱碳初期阶段,保持高碳铬铁合金加入持续时间为12 min,合金加料速度为4 t/min,供氧强度为400 m³/min,通过协调供氧强度与加料速率,可以实现炉内温度的相对稳定,确保冶炼过程的连续性和均匀性;

(3)当使用高铬铁水作为AOD炉的原料时,由于其热量富余可导致炉温上升至1680℃以上,该工艺条件下废钢加入量为169.1 kg/t,废钢占比为15.1%,以有效控制炉内温度。通过这种温度控制,不仅可以延长炉衬的使用寿命,还能提升整体的生产效率。

拟[J]. 铁合金, 2021, 52(6): 12-17.

- [7] Patra S, Nayak J, Singhal L K, et al. Prediction of nitrogen content of steel melt during stainless steel making using AOD converter [J]. Steel Research International, 2017, 88(5): 1600271.
- [8] 孙铭山, 邹勇, 范光伟. AOD冶炼不锈钢氮合金化控制模型的研究和应用[J]. 特殊钢, 2008, 29(6): 7-9.
- [9] Pitkälä J, Holappa L, Jokilaakso A. Nitrogen control in production of N-alloyed stainless steels in AOD converter: Application of sieverts' law [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2024, 55(1): 524-536.

[10] Wei J H, Cao Y, Zhu H L, et al. Mathematical modeling study on combined side and top blowing AOD refining process of stainless steel[J]. ISIJ International, 2011, 51(3): 365-374.

[11] 王 哲. 矿热炉与 AOD 炉双联法冶炼不锈钢的设计与研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

[12] Guan C J, You W. A nonlinear prediction model, incorporating mass transfer theory and expert rules, for refining low-carbon ferrochrome [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, 120(12): 671-680.

[13] 孙如意, 卢征统, 姬建民, 等. 缩短 AOD 炉冶炼 300 系不锈钢周期的探讨[J]. 铁合金, 2024, 55(1): 36-38.

[14] 王恭一, 赵惠忠, 黄日清, 等. AOD 炉渣对镁钙质耐火材料的侵蚀机理[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(4): 1496-1505.

[15] 卢嘉枫, 李 晶, 史成斌, 等. 304 不锈钢 AOD 冶炼过程脱碳保铬和铬烧损的研究[J]. 江西冶金, 2021, 41(1): 12-18.

[16] 易天龙, 吴华杰, 孙 悦, 等. AOD 精炼双相不锈钢 2101 去碳保铬研究[J]. 工程科学学报, 2020, 42(S1): 89-94.

版 权 声 明

根据《中华人民共和国著作权法》,作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿),全体作者同意,上述提交本刊发表的作品一经本刊录用,作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权,在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬,若编辑部再以其他形式在任何地点出版该论文,将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品,未曾发表;不涉及侵权和泄密问题;保证论文没有一稿多投;保证论文的署名权无争议,若发生问题,一切责任由作者承担,文责自负。

如有异议,请在投稿前说明,本刊即时处理。