

多位一体不锈钢冶炼在太钢的生产与实践

王建昌^{1,2} 刘卫东^{1,2} 王新录²

(1 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司,太原 030003)

摘要 通过分析太钢不锈钢原料铬镍生铁、高碳铬铁、铁水等的特性以及研究了原料中 Si、C 元素优化使用,采用中频炉、电弧炉、转炉、AOD 等工序进行多种组合,开发了 300 系、400 系钢种多条不同组合的不锈钢工艺路线,形成了多位一体不锈钢生产工艺。生产实践表明,400 系不锈钢采用 180 t 转炉脱磷铁水 + 50 t 中频炉熔化高碳铬铁预熔液兑入 AOD 冶炼的工艺,铬收得率提高 2.47%,硅铁消耗降低 5.5 kg/t,石灰消耗降低 10 kg/t,300 系不锈钢采用 160 t 电弧炉 + 2 × 50 t 中频炉熔化预熔液兑入 AOD 冶炼工艺,铬收得率提高 2.2%,电极消耗降低 1.8 kg/t,大幅降低了冶炼成本。

关键词 不锈钢 铬镍生铁 冶炼 铬收得率

Production and Practice of Multi-in-One Process for Stainless Steel Smelting at TISCO

Wang Jianchang^{1,2}, Liu Weidong^{1,2} and Wang Xinlu²

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron and Steel Group Co Ltd, Taiyuan, 030003; 2 Shanxi Taiyuan Stain Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract By means of analyzing the characteristics of TISCO stainless steel raw materials such as chromium-nickel crude iron, high-carbon ferrochrome and molten iron, studying the optimal use of Si and C elements in the raw materials, and using of various combinations of intermediate frequency furnace, electric arc furnace, converter, AOD and other processes, the several different combinations of stainless steel process routes for 300 series and 400 series stainless steel has been developed, and a multi-in-one process stainless steel production process is formed. Production practice shows that as 400 series stainless steel is smelted by mixing molten iron dephosphorized by 180 t converter and pre-melted of high carbon ferrochrome by 50 t medium frequency furnace charging to AOD process, the chromium yield increases by 2.47%, ferrosilicon consumption reduces by 5.5 kg/t, and lime consumption reduces by 10 kg/t, as 300 series stainless steel is produced by mixing the pre-melted by 160 t electric arc furnace + 2 × 50 t intermediate frequency furnace charging to AOD process, chromium yield increases by 2.2%, electrode consumption is reduced by 1.8 kg/t, and smelting cost is greatly reduction.

Material Index Stainless Steel, Chromium-Nickel Crude Iron, Smelting, Chromium Yield

不锈钢指在大气和酸、碱、盐等腐蚀性介质中呈现钝态、耐蚀而不生锈的含铬合金钢,其中 Cr 含量 10.5% ~ 30%。因其优异的耐腐蚀性和优良的综合性能,广泛应用于各工业和民用领域^[1]。2018 年全球不锈钢粗钢产量 5 070 万 t,中国不锈钢产量达 2 670 万 t,占全球产量的 52.3%,中国不锈钢表观消费量为 2 210 万 t。

随着低品位红土镍矿生产镍生铁的矿热炉—回转窑(RKEF)工艺的快速发展,我国不锈钢原料逐渐转变为以铬镍生铁、高碳铬铁为主,由于原料中含有较高的硅、磷、碳等元素,致使不锈钢生产和使用受到制约。为此,太钢根据市场原料变化,增加了中频炉熔化设备,开发了多位一体不锈钢生产工艺。

1 主要设备状况及生产能力

太钢炼钢二厂北区不锈钢生产线于 2006 年底投产,原设计产能为 150 万 t,经过改造,增加了 3 台 50 t 中频炉,1 座 180 t AOD 炉、1 座 180 t VOD 炉和 1 台直弧型板坯连铸机,2018 年不锈钢产量达

表 1 炼钢二厂北区不锈钢设备工艺参数

Table 1 Process parameters of stainless steel equipment at north district of No. 2 steelmaking plant

设备	炉数/座	公称容量/t	最大出钢量/t	炉膛尺寸/mm	冶炼周期/min
中频炉	3	50	60	198 0	60
电弧炉	2	160	180	800 0	80
AOD	3	180	200	583 5	75
VOD	1	180	180	-	90
LF	2	180	200	-	40

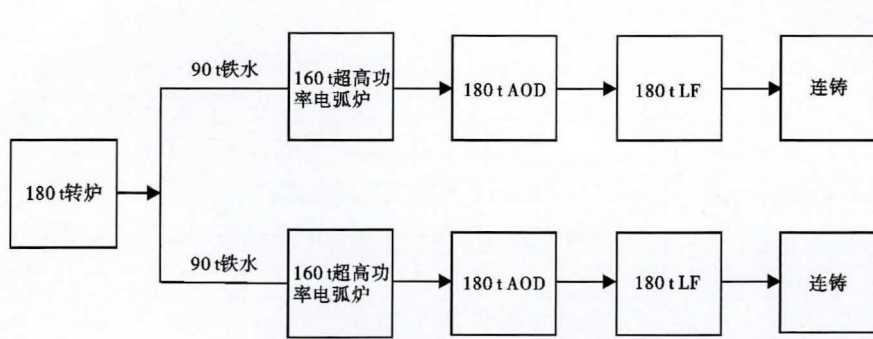


图 1 电弧炉半热装铁水冶炼不锈钢工艺流程

Fig. 1 Process flow sheet for smelting stainless steel by semi-hot charging molten iron in electric arc furnace

LF/LTS→连铸;

(2) 50 t 中频感应炉熔化高铬 + 160 t 电弧炉熔化镍生铁 → 180 t AOD → 180 t LF/LTS → 连铸;

(3) 50 t 中频感应炉熔化高铬 + 50 t 中频感应炉熔化镍生铁 + 160 t 电弧炉熔化镍生铁 → 180 t AOD → 180 t LF → 连铸。

320 万 t, 主要设备及工艺参数如表 1。

2 不锈钢生产工艺流程

太钢炼钢二厂北区不锈钢生产线原设计主要工艺流程为铁水半热装工艺, 如图 1 所示。

2.1 铬系不锈钢生产工艺流程

国内越来越多的不锈钢生产企业利用碳钢系统的高炉供应部分铁水给不锈钢系统, 利用铁水预处理脱磷冶炼不锈钢, 可提高钢水质量, 有效降低成本。太钢分别利用转炉脱磷和铁水三脱预处理脱磷装置, 结合中频炉熔化高铬, 开发了以下三条铬系不锈钢生产工艺路线。具体如下:

(1) 180 t 转炉铁水脱磷 → 180 t AOD 冶炼 → 180 t LF/VOD → 连铸;

(2) 180 t 转炉铁水脱磷 + 50 t 中频炉感应熔化高铬 → 180 t AOD 冶炼 → 180 t LF/VOD → 连铸;

(3) 160 t 铁水三脱预处理 → 180 t AOD 冶炼 → 180 t LF/VOD → 连铸。

2.2 镍系不锈钢生产工艺流程

2008 年开始, 我国逐步开发了以廉价的低镍红土镍矿为原料的烧结—高炉工艺生产高磷铬镍生铁和回转窑—矿热电炉 (RKEF) 工艺生产铬镍生铁, 降低了含镍原料的价格。铬镍生铁虽然价格低廉, 但存在杂质元素 (C、Si、P、S 等) 高的缺点^[2]。典型铬镍生铁成分如表 2。

为此, 太钢分析研究了铬镍生铁原料特性, 开发了电弧炉高效脱磷技术、AOD 高效还原脱硫技术、电弧炉前期渣在线还原利用技术及 AOD 高效脱碳脱硅技术, 形成了镍系不锈钢生产专有技术及多条不锈钢生产工艺流程。主要工艺流程有:

(1) 160 t 电弧炉熔化铬镍生铁脱磷 → 160 t 电弧炉冶炼 → 180 t AOD → 180 t

3 多位一体不锈钢高效冶炼工艺技术

3.1 以铁水为主原料的铬系不锈钢高效冶炼技术

3.1.1 以转炉脱磷铁水为原料的铬系不锈钢生产技术

太钢新不锈钢工程投产初期, 铬系不锈钢生产工艺路线为脱磷铁水-电弧炉-AOD, 工艺路线长, 铬收得率低, 通过工艺优化, 开发了以转炉脱磷铁水为原料的新的 AOD 一步法铬系不锈钢生产工艺。

针对超低碳氮铁素体不锈钢的生产, 充分利用铁水脱磷转炉脱碳速度快的特点, 提出了“脱碳任务再分配”的理念, 即由“AOD + VOD 两步法脱碳”演变为“BOF + AOD + VOD 三步法脱碳”, 形成了新的超纯铁素体不锈钢生产工艺, 转炉 (BOF) 完成铁水预处理脱磷和 AOD 大部分脱碳任务, 显著改善了 AOD 的脱碳保铬条件, 提高了 AOD 生产效率。转炉铁水预处理时间比铁水三脱预处理缩短了 30 ~ 35 min, AOD 精炼时间缩短了 10 ~ 12 min; 中高铬铁素体不锈钢的 C + N 总含量小于 170×10^{-6} 。

3.1.2 转炉 + 中频炉双联生产铬系不锈钢技术

炼钢二厂北区铬系不锈钢生产, 采用转炉脱磷铁水, AOD 冶炼过程中高碳铬铁全部在冶炼前期加入, 高碳铬铁加入量大, 吹氧脱碳过程铬烧损严重, 导致 AOD 还原硅铁消耗偏高, 铬收得率偏低。为此, 太钢开发了转炉 + 中频炉双联不锈钢母液生产铬系不锈钢工艺技术, 利用中频炉熔化高碳铬铁, 熔化过程不会造成铬元素损失, 中频炉熔化铬铁合金

表 2 典型铬镍生铁成分及生产方式

Table 2 Composition of typical chromium-nickel crude iron and methods of production

铬镍生铁	化学成分/%						生产方式
	Ni	Cr	P	S	C	Si	
高镍低磷	≥8.0	≈2.0	≤0.040	0.22	≈2.5	≥2.5	矿热炉
中镍高磷	4.0~8.0	≈3.2	≥0.050	0.11	3.5~4.2	1.0~2.5	高炉或矿热炉
低镍高磷	≤4.0	≈3.0	≥0.050	0.07	≈4.0	≤2.5	高炉

溶液兑入 AOD 冶炼, AOD 入炉温度提高, 满足吹氧脱碳保铬温度条件, 可减少 AOD 吹炼元素烧损, 提高铬收得率 2.47%, 硅铁消耗降低 5.5 kg/t, 石灰消耗降低 10 kg/t; 同时 AOD 每炉可加入 10 ~ 15 t 铬不锈钢废钢, 提高了 AOD 单炉产量, 降低了吨钢步骤费用, 工艺优化前后指标对比见表 3。

3.2 以铬镍生铁为主原料的镍系不锈钢低成本冶炼技术

高磷铬镍生铁具有较大的价格优势, 在镍系不锈钢中大量使用可降低不锈钢成本, 但其中含有较高的 P、Si、S、C 等残余元素, 含铬镍铁水脱磷、高效脱硫、合理利用镍生铁中硅等成为不锈钢冶炼的难题。针对存在的问题, 分析了不锈钢原料铬镍生铁、高碳铬铁、铁水等原料特性, 研究了原料中 Si、C 元素优化使用, 利用中频炉、电弧炉、AOD 等工序进行多种组合, 开发了镍系不锈钢低成本冶炼一系列相关技术, 实现了低成本不锈钢的生产。

3.2.1 电弧炉含铬镍铁水脱磷技术

由于不锈钢生产流程中 AOD 及后续工序没有脱磷能力, 高磷铬镍生铁的使用使得原料中磷含量大幅提高, 为保证成品磷符合产品要求, 必须在电弧炉或转炉工序完成脱磷工作, 而钢水中铬较磷易氧化, 如何实现脱磷保铬是一个冶炼难题。通过试验摸索, 采用 CaO-CaF₂-Cr₂O₃ 渣系脱磷, 电弧炉脱磷渣系成分如表 4。利用电弧炉脱磷动力学条件实现了电弧炉高磷铬镍铁水脱磷, 铬收得率达到 80% 以上, 脱磷率达到 50%^[3]。图 2 为 308 炉使用电弧炉含铬镍铁水脱磷技术生产脱磷前后铬和磷含量的对比情况。

开发了电弧炉熔化铬镍生铁脱磷技术及电弧炉双联法冶炼不锈钢预熔液生产镍系不锈钢工艺路线, 脱磷电弧炉主要进行含铬、镍原料的熔化、脱硅、脱碳、脱磷, 另一座电弧炉半热装脱磷钢水进行不锈钢母液的冶炼, 然后再在 AOD 中进行精炼^[4], 冶炼过程中各工序钢水成分如表 5。

3.2.2 中频炉 + 电弧炉双联冶炼不锈钢预熔液工艺

传统镍系不锈钢采用电弧炉-AOD 工艺路线, 电

弧炉中加入铬镍生铁、高铬、渣钢等难熔固体原料, 通电时间长, 电极消耗高, 铬收得率低, 电弧炉冶炼时间 95 min 以上, 电弧炉与 AOD 生产节奏不匹配。

太钢开发了中频炉 + 电弧炉双联熔化预溶液兑 AOD 冶炼不锈钢工艺, 电弧炉与中频炉分别熔化不同种类炉料, 中频炉熔化高碳铬铁, 铬铁没有烧损, 冶炼时间为 70 min, 电弧炉主要熔化铬镍生铁, 电弧炉装入量减少 50 t, 电弧炉冶炼时间缩短为 60 min, 电弧炉 + 中频炉双联工艺技术的实施, 实现了高碳铬铁与铬镍生铁分工序熔化, 缩短了电弧炉冶炼时间, 实现了电弧炉与 AOD 节奏匹配^[5]。与原工艺相比, 铬回收率提高 2.2%, 电极消耗降低 1.0 kg/t, 大幅降低了不锈钢冶炼成本。电弧炉双联工艺与常规工艺电弧炉入 AOD 成分及铬收得率如表 6。

表 3 工艺优化前后指标对比

Table 3 Index comparison between before and after process optimization

优化前后	铬收得率/%	硅铁消耗/kg·t ⁻¹	石灰消耗/kg·t ⁻¹
优化前	92.73	21.87	95.35
优化后	95.20	16.37	85.40

表 4 电弧炉铬镍铁水脱磷渣成分及碱度

Table 4 Dephosphorization slag ingredient and basicity for chromium-nickel crude iron liquid in electric arc furnace

化学成分/%						碱度(R)
FeO	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	CaF ₂	MgO	
6~10	45~55	13~18	6~9	3.5~5.0	1.5~2.5	3.0~3.5

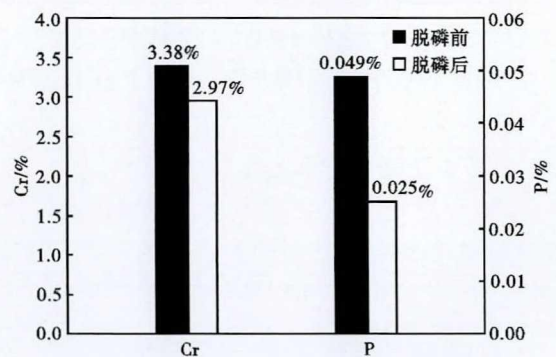


图 2 含铬镍铁水脱磷前后铬和磷含量

Fig. 2 Chromium and phosphorus content in chromium-nickel iron liquid before and after dephosphorization treatment

表 5 电弧炉热装脱磷钢水冶炼不锈钢母液各工序终点钢水成分/%

Table 5 Composition of molten steel at the end of each process for smelting stainless steel mother liquor by hot charging dephosphorization molten steel in electric arc furnace / %

冶炼工序	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
脱磷电弧炉	1.20 ~ 1.70	0.010 ~ 0.025	0.10 ~ 0.20	0.015 ~ 0.030	0.060 ~ 0.130	1.60 ~ 2.80	3.30 ~ 5.00
电弧炉	1.50 ~ 2.20	0.10 ~ 0.40	0.60 ~ 1.20	0.015 ~ 0.030	0.010 ~ 0.040	15.0 ~ 17.0	3.40 ~ 6.50
AOD 炉	0.03 ~ 0.06	0.30 ~ 0.80	1.00 ~ 1.30	0.015 ~ 0.040	0.001 ~ 0.002	17.6 ~ 18.6	7.90 ~ 8.30

表 6 中频感应炉 + 电弧炉双联工艺与常规工艺成分、铬收得率对比/%

Table 6 Comparison of components and chromium yield between intermediate frequency furnace-electric arc furnace duplication process and conventional process/%

工艺	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cr 收得率
常规工艺	1.8~2.5	<0.20	0.1~0.3	<0.035	0.04~0.30	17.0~18.5	4.0~7.0	92.8
双联工艺	2.9~3.6	0.7~1.0	0.1~0.3	<0.035	0.04~0.30	16.8~18.5	4.0~7.0	95.0

表 7 电弧炉前期渣和还原渣成分比较/%

Table 7 Comparison between early slag and reduction slag ingredient for electric arc furnace/%

类别	CaO	MgO	MnO	SiO ₂	TFe	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO
前期渣	47.9	4.92	1.22	30.7	5.3	4.25	7.32	0.18
还原渣	46.2	6.98	0.85	32.3	2.1	7.42	2.51	0.08

3.2.3 电弧炉前期渣在线还原利用技术

原工艺电弧炉原料主要为铬镍生铁、高碳铬铁、废不锈钢等高铬原料,电弧炉冶炼过程吹氧助熔,铬元素烧损严重,电弧炉前期渣中 Cr₂O₃ 含量较高(实测6%~10%)。一直以来,电弧炉冶炼不锈钢都是将前期渣通过出渣门排入渣罐,在排渣过程中,不可避免在渣中会带入一定量的钢水,致使铬收得率较低。

太钢开发了电弧炉前期渣在线还原利用技术,电弧炉前期渣不再排入渣罐,而是排入中频炉铬铁熔液的预熔包内,通过电弧炉出钢时钢流混冲搅拌,使高碳铬铁的硅与电弧炉前期渣中 Cr₂O₃ 充分反应,还原渣中铬,出钢后利用钢包大流量底吹氩气进行强搅拌,实现钢水中硅进一步与渣中 Cr₂O₃ 反应,渣中 Cr₂O₃ 含量由 7.3% 降低为 2.5%,提高了铬收得率,电弧炉前期渣与还原渣成分见表 7。

3.2.4 AOD 高效还原技术

铬镍生铁中硫含量较高,由于铬镍生铁、不锈钢渣钢等原料使用量的不断加大,使 AOD 入炉不锈钢母液中硫含量不断增加,达到 0.06% 以上,不锈钢母液硫含量的升高给 AOD 脱硫带来了困难,为此太钢开发了 AOD 高效还原技术,通过选用合理的不锈钢脱硫渣系,匹配还原渣碱度、还原时间以及还原期氩气流量等参数,开发 AOD 二次造渣脱硫工艺,实现了不锈钢快速脱硫,AOD 出钢硫含量稳定控制在 0.005% 以下,脱硫率达到 95% 以上。图 3 为冶炼 304 不锈钢 2017 年 1~12 月 AOD 钢水入炉、出钢硫含量及脱硫率。

3.2.5 双中频炉 + 电弧炉三联冶炼不锈钢母液技术

近两年来,电弧炉电极价格快速升高到 15~19 万元/t,电弧炉工序成本升高近一倍,降低电弧炉电极消耗可显著降低生产成本。因此利用现有中频炉设备,开发了双中频炉 + 电弧炉三联法冶炼不锈钢母液生产镍不锈钢工艺。采用一个中频炉熔化高碳铬

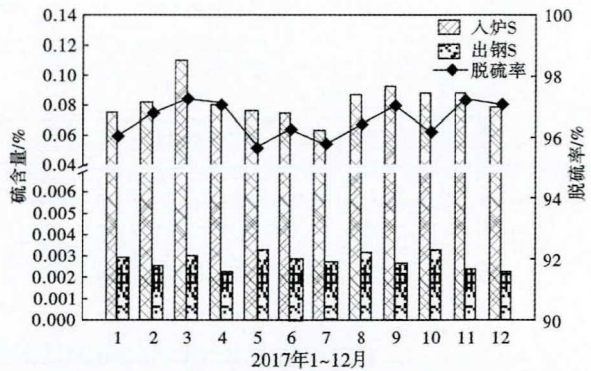


图 3 AOD 钢水初始和终点硫含量及脱硫率

Fig.3 Desulphurization rate, initial and end sulphur content in liquid steel of AOD

铁,另一个中频炉熔化铬镍生铁,两个中频炉熔化后的预熔液兑入电弧炉,电弧炉前期即可形成熔池,可提前吹氧脱硅,充分利用氧化放热,降低电弧炉耗电及电极消耗,同时早期形成熔池,可减少电弧炉供电、吹氧过程对原料中铬、镍元素烧损。实际生产中,电弧炉熔化原料由 120 t 减少为 80 t,镍钢电极消耗由 2.28 kg/t 降低至 1.52 kg/t。

4 结论

(1)太钢充分利用现有装备及廉价原料特性,开发了多位一体不锈钢生产工艺,掌握铬系不锈钢、镍系不锈钢低成本生产关键技术,提高了产品竞争力。

(2)太钢开发了廉价铬镍生铁使用技术及工艺路线,实现了铬镍生铁的大量使用,纯镍使用量大幅下降,铬镍收得率明显提升,降成本效果显著。

参考文献

[1]陆世英. 不锈钢概论[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007.
 [2]任 选. 铬镍生铁在不锈钢生产中的应用[J]. 山西冶金,2012,35(4):29-30.
 [3]谷 宇,刘 亮. 太钢不锈钢高效低成本生产技术[J]. 炼钢,2014,30(4):75-78.
 [4]段建平,张永亮. 太钢电炉炼钢技术发展现状[J]. 炼钢,2011,27(4):70-73.
 [5]王建昌,冯焕林. 160 t 电弧炉 + 50 t 中频炉冶炼不锈钢预熔液工艺实践[J]. 山西冶金,2018,41(3):66-67.

王建昌(1972-),男,正高级工程师,1996年太原理工大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。E-mail:wangjc@tisco.com.cn

收稿日期:2019-10-25