

·新材料新技术·

## 铁水为主要原料的不锈钢冶炼新工艺的开发

王一德 徐芳泓

(太原钢铁(集团)有限公司,太原 030003)

**摘 要** 太钢开发了通过预处理装置采用粉剂喷吹法对铁水进行脱硅、脱磷和脱硫;以 30 t EBT UHP EAF 熔化铁合金和部分废钢、75 t K-OBM-S 顶底复吹转炉和 VOD 精炼的冶炼不锈钢工艺,生产能力已达 50 万 t/a。重点介绍了工艺流程的选择、主体设备的确定和铁水脱磷、K-OBM-S 冶炼不锈钢模型、无氩冶炼多种不锈钢和高质量超纯铁素体不锈钢冶炼等关键工艺技术的开发和效果。

**关键词** 炉料 不锈钢 铁水预处理 K-OBM-S 吹炼 VOD 精炼

## Development of New Processes for Smelting of Stainless Steel With Hot Metal as Major Charging

Wang Yide and Xu Fanghong

(Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** The smelting of stainless steel has been developed by using powder injection process for desiliconization, dephosphorization and desulphurization of hot metal with pretreatment device, a 30 t EBT UHP EAF for smelting iron alloy and partial scrap, a 75 t K-OBM-S top and bottom combined blown converter and VOD refining at Taiyuan Steel. Its capacity has been up to  $50 \times 10^4$  t/a. The selection of processes, definition of major equipment, development of key technologies and application effect including hot metal dephosphorization, K-OBM-S smelting stainless steel model, free argon smelting various stainless steels and high quality extra-pure ferrite stainless steel smelting are presented emphatically.

**Material Index** Charging, Stainless Steel, Pretreatment of Hot Metal, K-OBM-S Blown Smelting, VOD Refining

20 世纪 90 年代,我国不锈钢表观消费量急剧增长,从 1995 年 71.7 万 t 增加到 2000 年的 167 万 t,平均年增长速度达 18%,预计到 2008 年将超过 600 万 t。虽然我国不锈钢产量也在快速增长,但由于巨大的市场需求,不锈钢国产化率在“九五”初期仅为 39%,远没达到市场的主导地位,大量依赖进口。

在品种结构方面,由于镍资源紧张,世界各国都在大力发展铬系不锈钢,其产量比例约占不锈钢总产量的 25%,主要不锈钢生产国美、日、法分别达到 34%、35% 和 65%;而我国长期以来一直低于 10%,特别是超纯铁素体不锈钢不能生产。针对我国镍资源特别紧缺的状况,扩大铬不锈钢,尤其是铁素体不锈钢的比重,将是我国当前不锈钢品种结构调整的重点。

在原料资源方面,我国属于发展中国家,社会不锈钢废钢存储量少,返回周期长,采用铁水为主要原料冶炼不锈钢符合我国国情。因此在长流程企业采用铁水冶炼不锈钢具有明显优势,对加速

发展我国不锈钢产业具有重要作用。

太钢以铁水为主要原料冶炼不锈钢的技术改造是“太钢 50 万 t 不锈钢系统改造工程”的重点项目之一,是太钢落实国家产业政策,实现产品结构调整,以优质产品顶替进口,满足国民经济发展需要的重要工程项目<sup>[1]</sup>。

太钢在引进主要设备的基础上,进行了工艺技术自主开发与创新,研究开发了以生产高质量铁素体不锈钢板材为主的工艺流程和相关技术,实现了不锈钢生产的高效、灵活、多品种和低成本。

### 1 工艺流程的选择和主体设备的确定

#### 1.1 工艺流程分析和选择

长期以来,国际上生产不锈钢的炼钢工艺主要有以废钢为主要原料的电弧炉二步法(EAF + AOD 或 VOD)和 AOD 三步法(EAF + AOD + VOD),其产量占世界不锈钢生产总量的 70% 左右。20 世纪 80 年代后期,由于一些国家的不锈钢废钢资源紧张,以铁水为主要原料的转炉三步法不锈钢

生产工艺,在长流程钢铁联合企业中得到了发展。但由于每个企业的具体条件不同,转炉所采用的工艺各有特点。为此,太钢通过国内外考察和调研,对典型不锈钢炼钢厂的生产工艺进行了对比分析,见表 1、表 2 所示。

表 1 典型不锈钢炼钢厂工艺流程对比分析

Table 1 Comparison and analysis of typical process applied at stainless steel works

企业	工艺流程	特点	局限性
日本 JFE 千叶四厂	DEP → SR- KCB → DC- KCB → VOD → CCM	以铁水为原料,双转炉冶炼,可使用铬原矿。	废钢使用量 ≤ 10%,原料结构不灵活。
巴西 ACESITA 厂	DEP + EAF → MRP → VOD → LF → CCM	以铁水为主要原料,三步法工艺。	MRP 转炉底部不能供氧,冶炼时间 ≥ 80 min,炉机匹配差。
韩国 浦项第二炼钢厂	EAF → AOD-L → VOD → CCM	以废钢为原料,三步法工艺。	只能使用废钢,AOD 炉衬寿命低(180 次)。
韩国 浦项第一、三炼钢厂,中国 太钢第三炼钢厂	EAF → AOD-L → CCM	以废钢为原料,二步法工艺。	只能使用废钢,品种少,AOD 炉衬寿命低(180 次)。

表 2 不同工艺综合对比分析

Table 2 Comprehensive comparison and analysis of different processes

类别	原料		工艺流程		主体冶炼设备
	铁水	废钢	二步法	三步法	
优点	资源广泛,纯净度高,热量高,适合 Cr 钢	资源回收, C: 0.01% ~ 0.30%, P: ≤ 0.04%, 适合 Ni 钢	流程短, 适合 Ni 钢	工艺灵活, 品种多, 钢水纯净, 适合 Cr 钢	DC-KCB、LD-OB、MRP、AOD-L、K-OBM-S
问题	C: 4.0% ~ 4.5%, P: 0.04% ~ 0.10%	资源少, Cu、Sn、Pb 高, 热量低	品种少, 炉龄低	流程长	

太钢根据上述分析,并结合自身特点,确定了以铁水为主要原料采用三步法冶炼不锈钢的生产工艺路线,即:预处理铁水 + UHP 电弧炉预熔合金 → K-OBM-S 复吹转炉冶炼 → VOD 精炼 + LF 精炼 → 立弯式方板坯连铸机。

### 1.2 主体设备确定及其设计主要参数和功能

结合太钢二钢厂铁水“三脱”处理经验,于 2000 年引进了日本川崎制铁公司和钻石公司的关键设备,新建了 2 套铁水“三脱”处理装置,即采用粉剂喷吹法进行铁水脱硅、脱磷和脱硫,每日可连续脱磷 20 炉(38 ~ 50 t/炉),最高为 24 炉,以便

为后工序提供纯净的铁水原料。同时为解决单纯用转炉冶炼不锈钢所产生的热量不足的问题,增设了 1 座 30 t EBT 超高功率电弧炉,变压器额定功率 25 MVA,最大出钢量 35 t,冶炼周期 60 min,用于熔化铁合金和部分废钢。

通过分析 AOD、MRP 和 K-OBM-S 三种复吹转炉的工艺特点,K-OBM-S 工艺十分有利于采用铁水为主要原料和特别适合生产不锈钢,因此选择了 K-OBM-S 顶底复吹转炉(表 3)。为生产超纯铁素体不锈钢,缩短转炉冶炼周期,实现工序节奏的匹配,选择了 VOD 精炼(表 4)。

表 3 K-OBM-S 顶底复吹转炉的主要参数

Table 3 Main parameters of K-OBM-S top and bottom combined blown converter

项目	参数
转炉容量/t	75
K-OBM-S 底吹风嘴/个	5
底吹气种类(中心管)	Ar、O <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub>
底吹保护气种类(环管)	N <sub>2</sub> 、LPG
冶炼周期/min	55
转炉炉衬寿命/炉	400
炉底寿命/炉	200

表 4 VOD 精炼装置的主要参数

Table 4 Main parameters of VOD refining unit

项目	参数
型式	真空罐盖车载式(双工位)
公称容量/t	75
真空泵型式	五级蒸汽喷射泵
处理周期/min	60

为满足下工序对不锈钢板坯和方坯原料的需求,新建了方、板坯兼容连铸机,并配置了先进的控制系统和质量保证功能(表 5)。

表 5 方板坯兼容连铸机主要参数

Table 5 Main parameters of slab concaster with bloom casting

项目	参数
铸机类型及半径	直弧形、铸机半径 8 m
中间包	正常容量 25 t,熔池深度 800 ~ 1 000 mm
连铸坯规格	断面:方坯 175 mm × 215 mm 和 220 mm × 220 mm,板坯(180 ~ 220)mm × (900 ~ 1 320)mm,长度:铸机方坯最大定尺长度为 3.6 m,板坯最大定尺为 10.5 m。
主要功能	漏钢预报、快速更换水口、铸流自动开浇、液面自动控制、电磁搅拌。

### 1.3 太钢全新组合流程的特点

(1) 原料适应性强:采用超高功率电弧炉,有

利于铁水和合金预熔液金属料优化配置,与废钢冶炼不锈钢工艺相比,原料优势明显。(2)物流和节奏匹配好、生产效率高:K-OBM-S转炉供氧强度高、炉容产能高、冶炼周期短(表6)。精炼炉除双工位VOD外,还配备了LF,炉机匹配良好。(3)适应品种规格多样化:方板坯不锈钢兼容连铸机,既满足了不锈钢板坯又满足了不锈钢方坯的需求;工艺兼容性好。

表6 不同转炉主要参数比较

Table 6 Comparison of main parameters of different converter

转炉	底供氧强度 $\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{t}^{-1})$	底吹风嘴 冷却方式	每吨炉容 产能/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	不锈钢生产厂
K-OBM-S	1.5	LPG强冷却	7 500	太钢第二炼钢厂
DC-KCB	0.25	惰性气体	3 780	JFE千叶四厂
LD-OB	0.2	惰性气体	3 620	新日铁八幡厂
MRP	0	惰性气体	4 600	ACESITA厂
AOD-L	0.8	惰性气体	3 000	太钢第三炼钢厂

## 2 关键工艺技术开发

### 2.1 铁水脱磷

铁水预处理工艺步骤包括:高炉炉前铁水预脱硅处理→预处理站铁水脱硅→预处理站铁水脱磷→预处理站铁水脱硫。即先在高炉出铁过程中,喷吹烧结矿粉进行脱硅,脱硅率可达50%以上。之后转到预处理站脱硅,按照脱磷前脱硅控制目标0.10%~0.20%的要求,控制合理的喷吹模式和熔渣碱度,使最终硅脱除率达到90%以上。最后进行铁水脱磷,通过应用合理的喷吹模式,控制合适的熔渣碱度和温度,使脱磷率达到90%以上,最低磷含量达到0.001%。

同时还开发了长寿命专用罐控制、长寿命喷粉枪、脱磷剂钝化、控制泡沫渣喷溅、铁水同步脱磷脱硫等相关技术,都收到了较好的效果。

### 2.2 金属料结构优化配置

解决K-OBM-S转炉热量不足有两种工艺,一是使用电弧炉熔化部分合金补充热量,二是转炉加焦碳。在满足物料平衡和热量平衡的前提下,应实现铁水使用比例最大化。并根据市场资源情况,在转炉中使用多种形式的镍原料,如镍板、镍豆和镍铁。另外由于电弧炉既可以只熔化铬铁合金,也可以熔化不锈钢返回废钢,根据返回废钢资源情况,返回比可控制为金属总配料量的0~20%,实现电弧炉返回比的灵活调整。

### 2.3 K-OBM-S冶炼不锈钢模型

应用所建立的K-OBM-S冶炼不锈钢数学模型<sup>[2]</sup>,对实际冶炼过程的二步法和三步法冶炼的数据进行了验证,验证结果表明,模型计算结果与实际冶炼结果基本符合。该模型的建立为K-OBM-S冶炼不锈钢提供了理论基础,对实际生产操作具有很好的指导意义。

按照终点成分控制范围的要求,二步法生产2Cr13时,碳含量模型计算结果与实际冶炼结果之绝对误差满足误差范围( $\pm 0.03\%$ )的命中率为65.7%,铬含量满足误差范围( $\pm 0.3\%$ )的命中率为82.9%。三步法生产0Cr18Ni9时,碳含量模型计算结果与实际冶炼结果之绝对误差满足误差范围( $\pm 0.03\%$ )的命中率为95.6%,铬含量满足误差范围( $\pm 0.3\%$ )的命中率为85.2%。

### 2.4 兼容性生产

为降低生产成本,提高生产效率,在掌握“三步法”生产工艺的基础上,根据不锈钢不同钢种的成分特性,对“三步法”工艺流程进行了优化,充分发挥K-OBM-S转炉粗炼和精炼兼容的特点,开发了1~3Cr13“一步法”、0~1Cr18Ni9“二步法”、0Cr13和00Cr12Ti“二步法”生产工艺技术。充分发挥了这条不锈钢生产线的工艺灵活性和成本优势,以取得效益最大化。

### 2.5 K-OBM-S转炉高寿命

为了提高转炉整体寿命,降低耐火材料消耗,提高转炉作业率,先后开发了风嘴冷却和“蘑菇头”控制工艺、冶炼操作护炉和底吹溅渣护炉、小炉底快速热更换和车载式炉壳整体更换、砖型设计和砌筑、调整炉底风嘴位置、转炉造渣、配气工艺、转炉炉底二次布料、环缝热补料加热等技术,使K-OBM-S转炉炉衬寿命从原设计400次,提高到2004年平均609次,最高寿命达到703次,达到国际先进水平,转炉每次周转时间由约100h缩短到5h。

### 2.6 无氩冶炼多品种不锈钢

太钢充分发挥三步法的工艺技术特点,根据不同不锈钢钢种的质量要求,利用VOD真空装置较强的脱氮能力,开发了“K-OBM-S转炉、VOD全程供氮,无氩冶炼不锈钢生产技术”,实现了304系列钢种全程无氩冶炼。

### 2.7 高质量超纯铁素体不锈钢

由于采用铁水为原料,使有害元素大幅度降

表 7 转炉铁水工艺和 AOD 废钢工艺冶炼不锈钢残余有害元素含量对比/%

Table 7 Comparison of residual deleterious element content in stainless steel smelting by hot metal converter process and scrap EAF-AOD process /%

评价项目	五害元素					其它元素		
	As	Sn	Sb	Pb	Bi	P	Cu	S
转炉铁水工艺	0.001 6 (0.001 4~ 0.001 8)	<0.001	<0.005	<0.005	<0.005	0.021, (最小 0.015)	≤0.05	0.002, (0.002~ 0.004)
AOD 废钢工艺	0.002 8 (0.001 6~ 0.003 8)	0.006 4, (0.003 2~ 0.010 6)	<0.005 (最大 0.005 8)	<0.005	<0.005	0.030, (0.024~ 0.035)	0.31, (0.10~ 0.87)	0.004, (0.001~ 0.008)

低,如表 7 所示。

在有效控制钢水纯净度的基础上,通过实施预吹氧+沸腾脱碳强底吹搅拌控制技术和合理的过程真空度和终点高真空度控制技术,实现了 409L 铁素体不锈钢  $[C+N] \leq 100 \times 10^{-6}$ ,其中 VOD 最低氮含量  $45 \times 10^{-6}$ 、成品最低氮含量  $64 \times 10^{-6}$ 。通过实施中间包低过热度及合理的冷却制度匹配技术、强电磁搅拌参数控制技术和微合金化技术,铁素体不锈钢连铸坯等轴晶比例达到 40%~90%;有效解决了连铸过程铸坯表面纵裂、角裂和内部裂纹等铬不锈钢连铸难题。同时通过实施钢水纯净度控制以及对夹杂物形态的变性处理技术,使连铸坯中氧含量  $\leq 30 \times 10^{-6}$ 、夹杂物尺寸  $\leq 20 \mu\text{m}$ 。

### 3 研究开发效果

#### 3.1 产量快速提升

太钢三步法冶炼不锈钢设计能力为 25 万 t/a (后调整为 35 万 t/a),2002 年底投产,2003 年生产不锈钢 26.05 万 t,达到国家 50 万 t 不锈钢系统改造项目目标要求。2004 年达到 37.05 万 t,比上年提高了 42.23%,超过设计能力,其中最高月产量为 45 819 t,已达到年产 50 万 t 不锈钢的生产能力,2005 年生产不锈钢 53.5 万 t,达到设计能力的 152%。

#### 3.2 开发的品种满足了国内市场的需求

开发的造币用 CTSZB、屋顶用 444、排气管用 436、货车用 TCS、集装箱用 410L 等多个品种填补

了国内空白。2005 年太钢生产铬不锈钢 30.79 万 t,使太钢生产铬钢比例由 2000 年的 8.07% 提高到 2005 年的 30%;使全国铬不锈钢产量比例由 2000 年的 7% 提高到 20% 以上。改善了我国不锈钢的品种结构。

### 4 结束语

太钢自主集成的以铁水为主要原料的“三步法”冶炼全新流程经过两年多的实践,形成了一整套相应的不锈钢冶炼工艺技术,在产量、品种、质量等方面均取得了显著效果。特别适应于生产铬不锈钢,取得了巨大的社会效益。同时对提高我国不锈钢产业集中度,推动我国不锈钢生产工艺技术进步和产品结构调整,以及我国长流程钢铁企业新建和改造不锈钢厂都具有重要意义。

文中有关图表均来自 2001 年~2004 年与德国、法国、奥地利、日本、巴西等国家相关不锈钢生产厂的技术交流。冶炼不锈钢主体设备参数来自太钢现使用装备的实际参数。

#### 参考文献

- 1 王一德,李学锋.“九五”时期太钢不锈钢生产技术的新发展.特殊钢,2001,22(4):32
- 2 K-OBM-S 不锈钢冶炼物料平衡和热平衡研究.东北大学与太钢科研合作报告,2003:9

王一德(1938-),男,教授级高工,中国工程院院士。现主要从事不锈钢、电工钢的技术改造工作。

收稿日期:2006-01-16