

三步法和二步法不锈钢冶炼工艺的分析 and 生产实践

刘卫东

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 分析了 HM DEP-KOBMS-VOD 三步法(铁水脱硅和脱磷预处理-KOBMS 转炉脱碳、合金化-真空吹氧脱碳)和 EAF/BOF-AOD 二步法(电弧炉炼 300 系不锈钢母液/400 系钢转炉脱磷-氩氧脱碳和合金化)生产不锈钢的生产效率和成本。三步法工艺生产铬不锈钢和超低碳氮不锈钢具有生产效率高、氩气消耗低、P-Cu-Pb 有害杂质含量低的优势,而 EAF-AOD 二步法工艺生产 304、316L 等铬镍不锈钢有可使用含镍生铁、不锈钢废钢、生产成本低,效率高的优势。文中介绍了太钢用三步法和二步法工艺生产的不锈钢品种结构和工艺实践。

关键词 二步法 三步法 不锈钢冶炼 工艺分析 生产实践

Production Practice and Analysis on Two-Step and Three-Step Process for Stainless Steels Steelmaking

Liu Weidong

(Technical Center, Shanxi Taigang Stainless Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The production efficiency and cost for stainless steel steelmaking by HM DEP-KOBMS-VOD three-step process (hot metal desiliconizing and dephosphorizing pretreatment-KOBMS converter decarburizing and alloying-vacuum oxygen decarburization) and EAF/BOF-AOD two-step process (300 series stainless steel parent melt steelmaking in arc furnace/dephosphorizing in converter for 400 series stainless steel-argon oxygen decarburizing and alloying) are analyzed. The three-step process has advantage to produce chromium steel and ultra-low carbon and nitrogen stainless steel including high productivity, low argon consumption and low P, Cu and Pb deleterious elements, while the (EAF-AOD) two-step process is favourable to produce 304, 316L etc chromium and nickel stainless steels, it is available to using pig iron bearing nickel and stainless steel scrap, and has low production cost and high efficiency. The grades and production practice for stainless steels melting by three-step and two-step process at Taigang are presented in this paper.

Material Index Two-Step Process, Three-Step Process, Stainless Steel Steelmaking, Analysis of Process, Production Practice

二步法不锈钢冶炼工艺 EAF-AOD(Argon Oxygen Decarburization)/VOD (Vacuum Oxygen Decarburization)为 20 世纪 60 年代西德开发,三步法不锈钢冶炼工艺 HM DEP(De-phosphorons by Hot Metal)-LD(Linz Donawitz Converter)/RH OB(Ruhstah-Hausen Oxygen Blowing)-VOD 为 20 世纪 80 年代日本开发^[1-3]。

山西太钢不锈钢股份有限公司(太钢)原有 1 条 EAF-AOD 二步法生产线,这也是国内第 1 条二步法不锈钢生产线,并于 1984 年生产出中国第 1 块不锈钢连铸坯。1999 年通过 18 t AOD 扩容改造(扩容后 AOD 容量为 40 t),不锈钢年产量首次超过 10 万 t 达到 13.5 万 t。

2002 年,太钢将原用于生产碳钢的 K-OBM (Kombiniertes = Combined Oxygen Bottom-Blowing Maxhutte Process)转炉改造成 KOBMS^[4],并新建铁水预处理三脱装置、VOD 真空处理装置和直弧型方板坯兼容连铸机,采用 HM DEP(铁水预处理脱磷)-

KOBMS-VOD(KOBMS、VOD 公称容量 80 t)三步法工艺生产不锈钢,具备年产 50 万 t 不锈钢生产能力。

2007 年 7 月,太钢新建两条采用 EAF-AOD (AOD 公称容量 180 t)二步法工艺、年产 200 万 t 不锈钢生产线投产。太钢成为拥有世界先进的二步法、三步法不锈钢生产工艺的现代化不锈钢生产厂,具备年产 300 万 t 不锈钢的生产能力,生产品种涵盖普通 400 系、300 系、耐热不锈钢、双相不锈钢、超纯铁素体不锈钢和核电专用不锈钢等几大类不锈钢,2011 年太钢不锈钢产量达到 302 万 t。

1 三步法和二步法生产工艺特点比较

1.1 生产工艺流程

三步法生产工艺流程 HM DEP-KOBMS-VOD-LF-CCM 的冶炼步骤:(1)高炉铁水采用喷吹法进行脱硅、脱磷预处理;(2)脱磷后预处理铁水兑入 KOBMS 转炉进行脱碳升温、合金化后出钢;(3)钢

水在 VOD 深脱碳、脱氮精炼;
(4)VOD 精炼钢水在 LF 进行成分、温度微调和夹杂物去除精炼,然后至板坯连铸浇铸。

二步法生产工艺流程 EAF(铬镍系不锈钢)/BOF(400 系铬不锈钢)-AOD-LF-CCM 的冶炼步骤:(1)含镍生铁、不锈钢废钢、高铬合金在电弧炉(EAF)熔炼成不锈钢母液/高炉铁水经转炉(BOF)脱磷;(2)EAF 不锈钢母液/BOF 脱磷钢水兑入 AOD 进行脱碳、合金化精炼;(3)AOD 精炼钢水在 LF 进行成分、温度微调及夹杂物去除精炼,然后交板坯连铸浇铸。

从生产效率和成本比较,三步法比二步法更有优势(表 1)。

1.2 三步法工艺冶炼铬钢、超低碳氮钢更具优势

因 KOBMS 转炉使用高炉铁水经脱磷处理为原料,脱磷铁水中不含 Cr、Ni,所有合金需要在转炉冶炼过程加入,生产不同钢种合金加入量不同,因而转炉内的热平衡和冶炼时间都不相同。通过热平衡计算和实际生产证明,生产 Cr13 系时转炉热量基本平衡,而生产 304(Cr18Ni8)时需要加入 1.5 t 焦炭用于升温,当然实际的焦炭加入量需要根据脱磷铁的温度和碳含量来确定。304 的冶炼时间平均 69 min/炉,而 0Cr13 平均冶炼时间仅 49 min/炉。

通过表 2 数据对比证明,采用三步法工艺生产铬系不锈钢,转炉工序各项指标明显优于生产铬镍不锈钢如 304 钢。

VOD 精炼装置通过降低系统真空度来促进脱碳反应的进行,可以在较低的温度下得到更低的碳含量,同时在脱碳过程中还具有一定的脱氮能力,因而更适用于要求超低碳、氮含量的超纯铁素体不锈钢的生产。

AOD 工艺通过吹入氩气、氮气等气体用以稀释系统内的 Pco 来达到促进脱碳反应的目的,而在 C

表 1 二步法、三步法工艺对比
Table 1 Comparison between two-step process and three-step process

项目	三步法 DEP-KOBMS-VOD	二步法 EAF/BOF-AOD	备注
主要原料	高炉脱磷铁水、铁合金	含镍生铁、不锈钢废钢、合金	二步法生产 400 系铬钢时采用 BOF-AOD 工艺,使用高炉铁水、铁合金
冶炼炉容量/t	90, KOBMS × 1 90, VOD × 1	180, BOF × 1 160, EAF × 2 180, AOD × 2	
连铸拉坯规格,厚度 × 宽度/mm	200 × (900 ~ 1 280)	200 × (1 000 ~ 2 100)	直弧形单流板坯连铸机
连铸台时产量/(t · h ⁻¹)	~102	~150	
吨钢耐火材料消耗/(元 · t ⁻¹)	~235	~115	
工序步骤费/(元 · t ⁻¹)	~990	~1 050	
铬收得率/%	~94	~93	三步法计算 KOBMS + VOD 两工序,二步法计算 EAF + AOD 两工序
镍收得率/%	~98	~97	
初炼炉冶炼时间/min	304 KOBMS ~70 430 KOBMS ~55	EAF ~100 BOF ~30	冶炼时间为兑钢到本炉出钢的间隔时间
精炼炉冶炼时间/min	304 VOD ~60 430 VOD ~55	AOD ~65 AOD ~76	

表 2 三步法 KOBMS 转炉冶炼典型钢种冶炼参数
Table 2 Steelmaking parameters for typical stainless steels by KOBMS converter, three-step process

钢种	脱磷铁水/t	高碳铬铁/t	纯镍/t	出钢量/t	升温焦炭/t	石灰单耗/(kg · t ⁻¹)	后工序 VOD 处理氩气单耗/(m ³ · t ⁻¹)	冶炼时间/min
0Cr13	77	~15	0	85	0	~47	~1.0	~49
409L	75	~14.5	0	83	0	~47	~21	~49
430	72	~20	0	86	0.3	~73	~1.0	~55
304	60	~24	~7.0	84	1.5	~90	0	~69

注:(1)高碳铬铁含 Cr 69%;纯镍含 Ni 99.5%;(2)脱磷铁水温度、碳含量基本相同,出钢温度及碳含量基本相同。

表 3 二步法和 AOD 生产典型钢的冶炼参数
Table 3 Steelmaking parameters for typical stainless steels by AOD, two-step process

钢种	预溶液成分/%		高碳铬铁/t	纯镍/t	石灰单耗/(kg · t ⁻¹)	氩气单耗/(m ³ · t ⁻¹)	冶炼时间/min
	Cr	Ni					
409L	0	0	~37	0	~107	~48	~90
430	0	0	~53	0	~110	~9	~76
304	~18	~6	1.0~4.0	3.0~6.0	~70	~13	~65
316L	~17	~8	2.0~5.0	3.0~5.0	~90	~15	~79

注:高碳铬铁含 Cr 62%,纯镍含 Ni 99.5%,冶炼时间兑钢到出钢。

≤0.05% 的低碳区域,碳的传质成为脱碳反应的限制性环节,生产 C≤0.01% 的超低碳钢主要靠延长反应时间(同时需要吹入大量氩、氮等气体,O₂/Ar 比为 1/6~1/7),因而生产超低碳、N 含量的钢种,不仅冶炼时间长,而且氩气消耗大(数据比较见表 2、表 3)。生产超纯铁素体不锈钢一般不采用 AOD 工艺。

1.3 二步法工艺的比较优势

(1)与三步法 KOBMS 工序比较,二步法 AOD 工序生产 304、316L 等铬镍不锈钢冶炼时间短、石灰消耗低。AOD 生产 409L 钢冶炼时间长达 90 min、氩气消耗高达 $48 \text{ m}^3/\text{t}$ (三步法 KOBMS 对应数据为 49 min 和 $21 \text{ m}^3/\text{t}$),因而采用 AOD 生产 Cr 含量大于 17% 的超纯铁素体不锈钢更为困难。

(2)EAF-AOD 二步法工艺,EAF 作为初炼炉有充足的热量来源,因而在熔炼不锈钢母液过程中可以大量使用含镍生铁、含铬镍渣钢等低价原料,降低不锈钢生产成本。与三步法工艺相比,生产 300 系铬镍钢种成本可降低约 500 元/t。

(3)二步法工艺可以更便于生产氮含量为 0.1%~0.4% 的控氮不锈钢种。奥氏体、双相不锈钢普遍使用氮进行合金化。超级奥氏体不锈钢、超级双相不锈钢正是以高氮合金化作为重要标志^[5]。气体增氮具有成本低、不污染钢水的优势。太钢 AOD 侧枪供气流量可达 $180 \text{ m}^3/\text{min}$,并掌握了采用气体增氮控氮技术,可以对钢水进行快速、准确氮合金化。因而双相不锈钢、超级奥氏体不锈钢等控氮不锈钢都安排在二步法生产线生产。

2 三步法、二步法不锈钢冶炼工艺在太钢的生产实践

2.1 三步法工艺在太钢的应用

2002 年,主要基于以下原因:(1)当时国内不锈钢废钢资源紧张;(2)太钢作为长流程钢铁生产企业,有充足的铁水供应;(3)氩气资源紧张、价格较高,而三步法较二步法的一个显著优势就是氩气消耗低;(4)采用 VOD 精炼的三步法工艺生产超纯铁素体不锈钢,较之二步法 AOD 精炼,可以达到更低的 C、N 含量,因而更具优势;(5)2001 年国内不锈钢市场 400 系钢种所占比例仅 21%,409L、436L 等超低碳氮、超纯铁素体钢种的生产基本是空白,产品拥有广阔的市场前景。所以太钢选择建设以铁水为主要原料的三步法不锈钢生产线,而未选择当时更成熟的 EAF + AOD 二步法工艺,太钢在 400 系不锈钢的领先发展证明太钢当时的选择是正确的。

2002 年 12 月 13 日,太钢采用 HM DEP-KOBMS-VOD 三步法工艺生产出第 1 炉 0Cr13 不锈钢,标志着三步法工艺在太钢的正式投产,这也是国内第一条三步法不锈钢生产线。伴随国内不锈钢市场的发展,太钢不断优化产品结构,积极开发和引导用户使用 400 系不锈钢产品。2004 年 2 月,生产出第 1 炉 409L,2004 年 5 月生产出第 1 炉超纯铁素体不锈钢

00Cr18Mo2。2006 年开发成功 T4003 铁路罐车专用不锈钢用于大秦线运煤专线,并大批出口南非、澳大利亚。2007 年开发 TTS443M 替代 304 用于电梯面板装饰,并成为太钢超纯铁素体不锈钢的代表品种。

2003 年时三步法工艺生产的 300 系不锈钢占比 71%,400 系占比仅 18%,到 2005 年三步法工艺生产的 400 系不锈钢占比为 57.2%,已超过 300 系 43% 的比例,品种结构初步优化。2012 年,太钢采用三步法工艺生产不锈钢中 400 系铬钢占比 91%,其中 Cr17 以上超纯铁素体不锈钢占比 19%,409L 占比 16%,产品市场竞争力较强。

采用三步法工艺生产超低碳氮及超纯铁素体不锈钢,产品 C + N 含量是体现冶炼控制水平的重要表征。太钢通过多年技术开发和实践,开发了“超低碳、氮不锈钢冶炼控制技术”、“二步法、三步法不锈钢冶炼控制技术”、“400 系不锈钢高质量连铸坯生产技术”等专有技术,掌握了多种不锈钢(表 4)冶炼全工序的碳、氮控制技术(表 5)。

2.2 二步法生产工艺在太钢的应用

2006 年太钢新建两条采用 EAF-AOD(AOD 公称容量 180 t)二步法工艺、年产 200 万 t 不锈钢的新生产线,并于 2007 年 7 月投产。产品 300 系为主占比约 70%,其余为 430、410S 等普通 400 系钢种。

依托不锈钢生产的技术积累,太钢对传统的 EAF-AOD 二步法工艺进行改革与创新,开发 BOF-AOD 生产铬钢的二步法新工艺(高炉铁水在 BOF 脱磷,在 AOD 完成精炼),生产 430、410S 等品种;开发 BOF-EAF-AOD 三步法工艺(高炉铁水在 BOF 脱

表 4 太钢不锈钢生产线产能和主要品种

Table 4 Main grades of produced by stainless steels production line at Taigang

工艺路线	产能/万 t	生产主要品种
三步法 DEP-KOBMS-VOD	50	430、409L、439、TTS443、436L、410S
二步法 BOF-AOD	50	430、410S、409L
EAF-AOD	200	301 系、304 系、316 系、321 系、309S、310S、S32205、S32101

表 5 典型超低碳氮钢种产品 [C + N] 控制水平

Table 5 [C + N] control level in typical ultra-low carbon-nitrogen stainless steels

钢种	产品 Cr/%	产品 [C + N]/ 10^{-6}				
		太钢前期水平			国际先进水平	
		平均	平均	最好	平均	最好
409L	12	230	135	105	130	90
436L	17	260	170	140	150	120
TTS443	21	290	200	150	190	140

表6 EAF-AOD工艺与BOF-AOD工艺生产430不锈钢冶炼参数和成本的比较

Table 6 Comparison of steelmaking parameters and production cost of 430 stainless steel produced by EAF-AOD process and BOF-AOD process

生产工艺	BOF-AOD	EAF-AOD
公称容量/t	BOF 180, AOD 180	EAF 160, AOD 180
母液原料	高炉铁水	铬不锈钢、碳素废钢
母液冶炼时间/min	BOF 25~30	EAF 60~70
步骤费/(元·t ⁻¹)	BOF ~185	EAF ~450
AOD冶炼时间/min	~76	~60
AOD高碳铬铁加入量/t	~50	~25
产品[P]/%	≤0.025	0.030~0.040
Cr收得率/%	AOD 97	AOD和EAF 93
制造成本比较/ (元·t ⁻¹)	430 410S	A A
		A+80 A+260

磷,随后在EAF加入合金熔炼出不锈钢母液,然后兑入AOD完成精炼),生产超低碳、氮409L及要求低磷、高合金含量双相不锈钢;开发大量使用高磷含镍生铁生产304的EAF-AOD工艺(EAF配料全部使用高磷含镍生铁,EAF熔炼的不锈钢母液兑入AOD完成精炼)。这些新工艺的开发,不仅补充、完善了不锈钢冶炼工艺,而且有利于降低生产成本和提高产品质量(表6)。

与BOF-AOD工艺相比,EAF-AOD工艺生产430、410S成本每吨升高约80元、260元。造成EAF-AOD工艺成本较高的主要原因是:电弧炉生产步骤费较高而铬收得率较低。同时电弧炉因冶炼周期最长,是不锈钢全线的瓶颈环节,采用BOF-AOD新工艺生产铬钢,可以释放电弧炉的产能,进而提高不锈钢产量。此外,采用BOF-AOD工艺生产铬钢,还可以规避铬不锈钢废钢资源紧张、碳素废钢P高对生产的制约。

一方面开发BOF-AOD工艺生产常规铬钢品种,以优化生产组织、降低生产成本;另一方面,应对国内镍资源紧张、国际市场镍价上涨的形势,太钢在业内率先使用含镍生铁,优化生产工艺增加含镍生铁的使用量,开发电弧炉全部熔化高磷含镍生铁(P≥0.060%)脱磷工艺,脱磷处理后P≤0.025%,能够满足绝大部分不锈钢钢种的使用要求。

2012年太钢使用含镍生铁95万t,折合纯镍约5.6t,约占太钢镍使用量的62%,有效降低镍采购成本(含镍生铁中镍按98%计价)。自从含镍生铁在中国大量使用,LME镍价从2007年5月最高5.4万美元/t跌至2012年平均1.8万美元/t,而2007年至2012年,中国不锈钢产量从720万t增加到1575万t(不锈钢及镍基合金生产用镍占镍消费量的70%以上)。

充分利用EAF-AOD两步法工艺热量充裕的优势,太钢积极开发316L(00Cr17Ni12Mo2)、310S(0Cr25Ni20)、309S(0Cr23Ni13)耐热不锈钢、S32205(00Cr22Ni5Mo3N)双相不锈钢等中高端、高合金铬镍不锈钢,产品在石油化工、造纸、造船等领域广泛应用,大量替代进口,耐热钢不锈钢、双相不锈钢国内市场占有率超过75%。

3 结论

(1)在2002年和2007年,山西太钢不锈钢股份有限公司建成了具有世界先进水平的两步法、三步法不锈钢生产线,通过技术集成和二次开发,充分发挥两步法、三步法生产工艺的特性,采用三步法工艺以脱磷高炉铁水、高碳合金为原料生产400系、超纯铁素体不锈钢,采用两步法工艺以含镍生铁、高碳合金、不锈钢渣钢等低价原料生产300系、耐热不锈钢、双相不锈钢。

(2)太钢DEP-KOBMS-VOD三步法工艺,以脱磷高炉铁水、高碳合金为原料生产400系铬钢、超纯铁素体不锈钢,具有生产效率高、氩气消耗低、P、Cu、Pb有害杂质含量低的优势;EAF-AOD两步法工艺生产300系铬镍不锈钢,可以使用含镍生铁、不锈钢渣钢等低价原料,具有生产成本低、效率高的优势。

(3)太钢从1999年到2011年,用12年实现了不锈钢产量从10万t到300万t的跨越,太钢生产的超纯铁素体不锈钢、铁路车厢用不锈钢、罐箱用不锈钢、双相不锈钢、耐热不锈钢、核电用不锈钢等多个品种不但可替代进口,而且国内市场的占有率也位居第一。

参考文献

- [1] 根本力男. 不锈钢制造技术的进步[C]. 西山纪念技术讲座, 1987:306.
- [2] 竹内英磨. 不锈钢制造技术的进步[C]. 西山纪念技术讲座, 1987:29.
- [3] 林企增,张继猛. 不锈钢生产技术新进展[J]. 特殊钢,1999,20(5):7-14.
- [4] Fritz E, Steins J. Outline of Stainless Steel Production with an Emphasis on the KOBM-S Process. BHM, 140 Jg. 1995, Heft 5:227-34.
- [5] 陆世英. 不锈钢概念[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007:28.

刘卫东(1970-),男,工程师,1992年武汉科技大学毕业,不锈钢、碳钢冶炼工艺研究。E-mail:liuwd@tisco.com.cn

收稿日期:2013-04-01