

不锈钢冶炼设备和工艺路线

郝祥寿

(中冶华天工程技术有限公司, 马鞍山 243005)

摘要 通过对不锈钢主要冶炼设备——初炼炉、精炼炉、真空吹氧装置的分析以及一步法、二步法、三步法不锈钢工艺路线的比较, 提出应根据不锈钢的生产规模、产品大纲、原料供应、现有车间条件和动力供应状况, 合理选择相应的主要冶炼设备和工艺路线, 以便达到最佳的经济、技术效果。文中列出不锈钢冶炼设备和工艺路线选择一览表。

关键词 不锈钢 冶炼设备 工艺路线

Metallurgical Equipment and Process Route for Stainless Steel Steelmaking

Hao Xiangshou

(Huatian Engineering and Technology Corp, MCC, Maanshan 243005)

Abstract By analysis on main metallurgical units- primary melting furnace, refining furnace, vacuum blowing oxygen unite for stainless steel and comparison of process routes- one- step, two- step and three- step steelmaking process route, it is put forward that the corresponding main metallurgical equipment and process route shall be selected reasonably according to production scale, products program, raw materials supply and present shop situation and dynamic conditions to get optimum economic and technical effect. An optimum selection schedule of metallurgical equipment and process route for stainless steelmaking is presented in this paper.

Material Index Stainless Steel, Steelmaking Equipment, Process Route

我国不锈钢表观消费量从 1999 年 150 万 t 猛增到 2003 年的 420 万 t, 年增长率 45%, 成为世界上继美国之后第二消费大国。自产不锈钢钢材从 1999 年 26 万 t 猛增到 2003 年的 177.8 万 t, 年增长率 145%, 4 年增长了 6.8 倍, 成为世界上不锈钢产能增长最快的国家。不锈钢的进口量从 1999 年的 125 万 t 增长到 2003 年的 296 万 t, 进口平均增长率为 34.2%, 我国成为世界上最大的不锈钢进口国^[1]。

1 不锈钢主要冶炼工艺设备的配置

1.1 初炼炉

初炼炉只起熔化初炼作用, 负责向精炼炉提供初炼钢水, 或称之为不锈钢母液。视原料条件和规模不同可以选择感应炉、电弧炉或转炉。

以返回废钢作为主原料时, 感应炉和电弧炉均可作为初炼炉, 而感应炉一般用于小规模生产。

以普通废钢作为主原料时, 选择电弧炉作为初炼炉, 熔化废钢和合金。

以高炉铁水作为主原料时, 选择 LD、OTB、

AOD、K-OBM-S 等转炉作为初炼炉, 用于脱磷和初脱碳以及熔化少量废钢和合金。若原料中废钢量和合金比例较大时, 仍然要选择电弧炉熔合金和废钢, 但此时电弧炉根据需要, 还可以提供混匀不锈钢母液成分和温度的功能。若原料中合金大量来源于矿石时, 如铬矿、锰矿和镍矿, 可采用转炉作为初炼炉还原矿石中合金元素。如日本川崎就采用了铬矿石还原获得金属铬。

一般认为, 转炉作为初炼炉是不经济的。因为它需要高炉铁水提供母液和热量来源, 必然延长工艺路线, 一次性投资增加。只有在电力匮乏的情况下, 或者采用电弧炉作为初炼炉电力成本难以接受时, 可以考虑选用转炉作为初炼炉。

1.2 精炼炉

精炼炉的功能主要是降碳保铬, 同时伴随脱硫的过程。生产不锈钢最为常用的精炼炉是转炉, 主要有 AOD、K-BOP、K-OBM-S、MRP、CLU、KCB-S 等^[2]。

AOD 全称 Argon-Oxygen Decarburization Conve-

ter,通常称为氩氧炉。AOD是最常用的精炼炉,不锈钢精炼炉中约有70%为AOD,大量使用在二步法和三步法冶炼工艺中。传统的AOD是在转炉下部安装侧吹风嘴,喷吹氧气和氩气,进行脱碳和精炼。目前在AOD转炉的基础上增加顶枪,喷吹氧气和混合气体,称之为AOD-L精炼炉,可以加快脱碳速度,缩短冶炼周期和提高生产能力。日本大同(Daido)制钢公司在AOD转炉的基础上增加真空系统,定义为AOD-VCR精炼炉,可以用于生产低碳不锈钢,还可以降低氩气和硅铁消耗,缩短冶炼周期。

K-BOP是川崎制钢公司(Kawasaki Steel Corporation)在顶吹碱性氧气转炉BOF基础上增加了底吹喷嘴,可以喷吹氧气和冷却介质甲烷,还可以喷吹石灰。

K-OBM-S是由奥钢联公司(VAI)在K-BOP基础上进一步改进和发展的技术,它在顶吹碱性氧气转炉BOF基础上增加了底吹喷嘴或侧吹喷嘴。实际上K-BOP和K-OBM-S最初都是顶底复吹碱性氧气转炉,最近K-OBM-S又增加使用了侧吹喷嘴,与AOD-L非常类似。K-BOP和K-OBM-S可以适用于现有的顶底复吹碱性氧气转炉,经局部改造后生产不锈钢,当然仅有设备是不够的,还要摸索一套冶炼工艺模型。

GOR是乌克兰在顶底复吹碱性氧气转炉上开发的,底吹喷嘴采用天然气或碳氢化合物进行保护,与K-BOP和K-OBM-S相当。

MRP是Metal Refining Process的缩写,由曼内斯曼德马克的胡金根厂(Mannesmann Demag Huttentechnik)在底吹转炉基础上发展的,早期通过底吹喷嘴交替喷吹氧气和惰性气体。后期又增加了顶枪,顶部喷吹氧气,底吹喷吹惰性气体,形成MRP-L型精炼炉。

CLU是由Uddeholm of Belgium and Creusot-Loire of France联合开发的,类似于AOD,但底吹稀释气体改成了水蒸汽,并且是从底部吹入。

KCB-S是Krupp Combined Blowing-Stainless的缩写,由Krupp Stahl AG在AOD炉的基础上增加了顶吹,与AOD-L相当。

1.3 真空吹氧精炼装置

真空吹氧精炼装置(主要有VOD和RH-OB/RH-KTB等)的功能主要是在真空状态下进一步脱碳,完成最终成分的微调、纯净度的控制。该法

初衷用于生产超低碳、超低氮的不锈钢,当Ar气气源不能保证时或不够充足时,也常在二步法后增设真空吹氧精炼炉,从而降低Ar气消耗,达到同样的精炼效果。

VOD和RH-OB/RH-KTB是在VD真空炉和RH真空炉的基础上增加了一套氧枪。RH-OB在真空室侧壁上安装氧枪,而VOD和RH-KTB则在真空室顶部安装了氧枪,目的都是向真空室内的钢水喷吹氧气。

各种精炼设备的比较见表1。

表1 冶炼不锈钢的各种精炼设备的比较

Table 1 Comparison of various refining units for stainless steel steelmaking

工艺设备	喷嘴安装位置	底吹或侧吹介质	顶吹介质	投资指数
AOD/AOD-L	侧部	O ₂ 、N ₂ 、Ar、Air、CO ₂	O ₂	1
KCB-S	侧部	O ₂ 、N ₂ 、Ar	O ₂	1
K-BOP/K-OBM-S	底部或侧部	O ₂ 、N ₂ 、Ar、碳氢化合物	O ₂	1.3~1.5
MRP, ASM	底部	O ₂ 、N ₂ 、Ar		1
CLU	底部	O ₂ 、H ₂ O(蒸汽)、N ₂ 、Ar	O ₂	1
GOR	底部	O ₂ 、N ₂ 、Ar、碳氢化合物	O ₂	1.3~1.5
AOD-VCR	侧部	O ₂ 、N ₂ 、Ar		1.1~1.2
VOD/SSVOD	底部	O ₂ 、Ar	O ₂	1.1~1.2

2 不锈钢冶炼工艺路线

生产不锈钢的冶炼生产工艺可分为一步法、二步法和三步法。

2.1 一步法

一步法是指在1座电弧炉内完成废钢熔化、脱碳、还原和精炼等工序,将炉料一步冶炼成不锈钢。随着二次精炼工艺的不断发展,一步法冶炼生产工艺由于使用返回废钢量大,冶炼周期长,作业率低,生产成本低,被逐步淘汰,电弧炉则成为初炼炉,承担熔化废钢和合金料的任务。

2.2 二步法

二步法主要是以电弧炉为初炼炉熔化废钢及合金料,生产不锈钢初炼钢水,然后在不同的精炼炉(如AOD、CLU、K-OBM、KCB、MRP、GOR、VOD等)中进行精炼成合格的不锈钢钢水。初炼炉可以是电弧炉或转炉。二步法中精炼炉又可分为在常压和真空状态下的精炼,从而形成EAF-转炉

(AOD、CLU、K-OBM、KCB、MRP、GOR) 二步法工艺和 EAF-真空吹氧 (RH-OB、RH-KTB、VOD) 二步法工艺。

2.3 三步法

三步法的基本工艺流程是初炼炉-AOD-真空吹氧精炼炉。初炼炉只起熔化初炼作用,初炼炉可以是电弧炉或转炉,负责向 AOD 等精炼炉提供初炼钢水。AOD 的功能主要是快速脱碳,并避免铬的氧化,与 AOD 具有同样功能的冶炼设备常用的还有 K-OBM-S、K-BOP、MRP、CLU、KCB-S 等。最后由真空吹氧精炼炉 (VOD、RH-OB、RH-KTB 等)完成最终成分的微调、纯净度的控制。该法可用来生产超低碳、超低氮的不锈钢。

2.4 不同冶炼工艺路线的比较(表 2)

目前世界上大多数不锈钢厂采用电弧炉-AOD 二步法生产不锈钢,其产量约占世界不锈钢总产量的 70%,采用电弧炉-转炉-VOD 三步法生产不锈钢,其产量约占世界不锈钢总产量的 20%,而采用其它方法生产不锈钢,其产量约占世界不锈钢总产量的 10%。

表 2 不锈钢不同冶炼工艺路线的比较

Table 2 Comparison of process routes for stainless steel steelmaking

工艺路线	钢种适应性	入炉原料	生产率	Ar 气消耗	耐火材料消耗	生产成本	工程投资
一步法	差	苛刻	低	无	较高	高	最低
EAF-转炉	一般	适应性强	高	高	低	低	低
二步法 EAF-真空吹氧炉	一般	适应性强	低	低	较高	最高	较高
转炉-转炉	一般	适应性强	高	高	低	低	高
三步法	强	适应性强	高	低	高	高	最高

3 不锈钢冶炼生产工艺路线的选择

不锈钢冶炼生产工艺的选择取决于很多因素,首要因素是操作成本,它受到生产规模、产品大纲、原材料供应、后续工艺、现有车间条件和动力供应状况等因素的影响。由于各种因素随着市场迅速变化,生产工艺选择应该具有一定的灵活性。

一般情况下,三步法的生产成本要高于二步法,但由于上述各种因素的综合影响,要根据实际

表 3 不锈钢不同冶炼工艺路线选择的考虑因素

Table 3 Selection schedule of process routes for stainless steelmaking

工艺设备或路线	生产规模		产品大纲		主要原材料			现有车间条件			动力供应状况	
	小	大	常规碳氮	超低碳氮	高炉铁水	铬矿	废钢	转炉厂	电炉厂	新建	电力匮乏	氩气匮乏
预处理					●				●			
初炼炉	矿热炉					●						
	感应炉	●					●					
	电弧炉	●	●	●	●	○	●	○	●	●	○	
	转炉		●	●	●	●	●	●	●	●	●	
精炼炉	AOD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○
	K-BOP		●	●	●	●	●	●	●			●
	K-OBM-S		●	●	●	●	●	●	●	●		●
	MRP		●	●	●	●	●	●	●			●
	CLU			○	●	●	●	●	●			●
真空炉	KCB-S		●	●	●	●	●					●
	VOD		●	●	●							●
	RH-OB		●	●	●							●
工艺线	RH-KTB		●	●	●							●
	一步法	●										
	二步法		●	●								○
三步法		●	○	●								●

注:“●”表示优先选择的设备或工艺;“○”表示次选的设备或工艺。

情况,具体分析,合理选择(表 3)。

3.1 生产规模

不锈钢的生产规模对冶炼生产工艺的选择,具有制约作用。生产规模小,一般年产 3 万 t 不

锈钢,不锈钢返回废钢有可靠保证的,可以选用一步法冶炼生产工艺。

不锈钢的生产规模达到 5 万 t 以上,其生产工艺不宜采用一步法,应该选用二步法或三步法

组织生产。

3.2 产品大纲

产品大纲中对于生产 $(C+N) > (250 \sim 300) \times 10^{-6}$ 的不锈钢, 可选用二步法组织生产。若生产规模大, 产品范围宽, 考虑到生产节奏和能源供应等因素, 宜配置三步法冶炼生产工艺路线的设备, 其中分产品按照二步法或三步法组织生产。

最终产品若要求 $(C+N) \leq (250 \sim 300) \times 10^{-6}$, 如 S44700、S44800 等超低碳(0.01%)、超低氮(0.02%)铁素体不锈钢, 必须选用三步法工艺流程, 在真空吹氧精炼炉中完成最终成分的微调 and 脱气处理^[3]。

3.3 原材料供应

不锈钢冶炼的原材料, 主要是金属料和合金。金属料包括返回废钢, 普通废钢和高炉铁水。合金主要包括高、中、低碳铬铁, 电解镍铁、金属镍或 NiO, 硅铁, 锰铁。含铬铁水和铬矿石具有金属料和合金的双重性质。不同的金属料将会采用不同的冶炼生产工艺。

金属料采用返回废钢或普通废钢时, 一般选用电弧炉作为初炼炉, 熔化废钢和合金料生产不锈钢母液。典型的冶炼生产工艺是选用 EAF-AOD 二步法或选用 EAF-AOD-VOD 三步法组织生产。我国的太钢不锈三炼钢、宝钢五钢公司和大连特钢等企业均采用该生产工艺。

金属料采用高炉铁水时, 由于硅、硫、磷含量高, 高炉铁水必须首先进行三脱处理, 获得低硫、磷不锈钢母液, 再经过精炼炉精炼。精炼炉目前大多选用 AOD 转炉或顶底复合吹炼转炉, 如果要冶炼低 [C] 或低 [N] 不锈钢, 后道工序还要配置 RH-OB 或 VOD 进行真空精炼。如果要冶炼 Cr-Ni 系或 Cr-Ni-Mo 系不锈钢, 还需要配置电弧炉熔化钼铁和镍铁。典型的冶炼生产工艺是高炉铁水 → 铁水预处理 → (EAF 熔化合金) 顶底复合吹炼转炉 → 真空精炼。日本川崎钢铁公司的 K-BOP 法采用了高炉铁水 → 铁水预处理 → 顶底复合吹炼转炉 LD-OBM → 真空精炼 VOD。日本新日铁公司室兰制铁所的 RH-OB 法, 即采用高炉铁水 → 铁水预处理 → 顶底复合吹炼转炉 → RH-OB 真空精炼。我国太钢二钢厂采用了高炉铁水 → 铁水预处理 → (EAF 熔化合金) 顶底复合吹炼转炉 K-OBM-S → VOD 真空精炼。

金属料采用部分铬矿石时, 一般以高炉铁水

作为主原料, 铬矿石主要是通过转炉中进行还原, 提供金属铬, 降低不锈钢生产成本。由于铬矿石加入数量、加入时机以及还原工艺国内尚未完全掌握, 世界上仅日本川崎钢铁公司千叶厂完全掌握该冶炼生产工艺。

金属料采用部分铬铁水 + 废钢时, 冶炼生产工艺可采用矿热炉 → EAF-AOD 二步法或选用矿热炉 → EAF-AOD-VOD 三步法, 通过矿热炉冶炼铬矿石, 生成含铬铁水。电弧炉作为初炼炉熔化废钢和合金料, 熔化半钢与含铬铁水混匀, 制成不锈钢母液。该工艺在国外不多见, 但在宝钢一钢公司已经成功采用, 杭钢亚通特钢公司也采用了该工艺路线。该工艺可以适用于铁合金厂的改造或在铁合金厂附近建设的不锈钢工厂内使用。

3.4 现有车间条件和动力供应状况

新建不锈钢厂, 可以根据需要确定合理、经济的工艺路线。但对于旧厂改扩建, 必须结合现有车间条件和动力供应状况。

原车间没有电弧炉或感应炉, 又没有充足的电力供应, 却有高炉和转炉设施, 可选择高炉铁水 → 铁水预处理 → 顶底复合吹炼转炉 → 真空精炼组成的典型冶炼生产工艺。

若氩气供应不足, 精炼炉不宜采用 AOD, 则采用与 AOD 具有同样功能的冶炼设备, 如 K-OBM-S、K-BOP、MRP、CLU、KCB-S 等。或采用初炼炉 → AOD → 真空吹氧精炼炉 (VOD、RH-OB、RH-KTB 等) 三步法组织生产, 降低氩气消耗。

4 结论

应根据不锈钢冶炼的生产规模、产品大纲、原材料供应、现有车间条件和动力供应状况, 选择适合的不锈钢冶炼主要工艺设备和工艺路线, 以达到较佳的经济、技术效果。

参考文献

- 1 中国特钢协不锈钢分会. 不锈钢-市场与信息. 2004(5):10
- 2 知水, 王平, 侯树庭, 等. 特殊钢炉外精炼. 北京: 原子能出版社, 1996
- 3 Richard J. Fruehan Editor. The Making, Shaping and Treating of Steel. The AISE Steel Foundation, 1998

郝祥寿, 男, 40岁, 高级工程师。1986年毕业于重庆大学钢铁冶金专业, 从事炼钢和连铸工艺设计及研究。

收稿日期: 2004-09-20