

## 不锈钢 AOD 精炼工艺的应用和发展

刘 闯

(宝钢工程技术有限公司冶炼部, 上海 201900)

**摘 要** 简要介绍了我国浦钢 30 t AOD、太钢 40 t AOD、宝钢不锈钢分公司 120 t AOD 不锈钢精炼炉的经济技术指标及应用; 叙述了 AOD 精炼技术-脱碳、脱硫、以 N<sub>2</sub> 代 Ar 和顶枪技术的发展; 讨论了 AOD 精炼的供气形式的完善和炉衬寿命等技术问题。

**关键词** 不锈钢 AOD 精炼 应用 发展

## Application and Development of AOD Process for Stainless Steel Refining

Liu Chuang

(Melting Division, Baosteel Engineering and Technological Co Ltd, Shanghai 201900)

**Abstract** The economic-technical indexes and application of a 30 t AOD unit at Pugang, 40 t AOD units at Taiyuan Steel and an 120 t AOD unit at Shanghai No1 Steel in China are summarized. The development of AOD refining technology such as decarburization, desulphurization, replacing Ar with N<sub>2</sub> and top lance technology is presented and the technical issues including to perfect gas supply model for AOD refining and service life of furnace lining are discussed in this article.

**Material Index** Stainless Steel AOD Refining, Application, Development

近 30 年来, 不锈钢 AOD 精炼工艺以其独特的优点得到了迅速发展。据美国普莱克斯公司统计, 2000 年全球 80% 以上的不锈钢, 美国 98% 的不锈钢和 78% 的工具钢是用 AOD 生产的。

### 1 不锈钢 AOD 精炼技术的应用和发展

#### 1.1 AOD 精炼技术的应用

##### 1.1.1 浦钢特钢 30 t AOD

浦东钢铁公司特钢分厂 30 t AOD 不锈钢精炼炉的主要原料为不锈钢返回料、碳钢重废料、镍板、高碳铬铁、中碳铬铁等, 其消耗指标见表 1。

30 t AOD 智能精炼系统冶炼不锈钢工艺流程如图 1<sup>[1]</sup>。钢水从 30 t EAF 出钢经称量后兑入 AOD, 操作人员将冶炼钢种的编号、温度、钢水重量、相应钢水成分的初始值和目标值输入智能系统, 然

表 1 浦钢特钢 30 t AOD 精炼奥氏体不锈钢的经济技术指标

Table 1 Economic-technical indexes of a 30 t AOD unit refining austenite stainless steels at Pugang Special Steel

钢种	气体消耗/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )			渣料消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )		合金收得率/%				兑钢至出钢时间/min
	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	还原硅	石灰	Cr	Ni	Mn	合金总计	
304	10	56	11	9.5	55.0	99.0	99.5	92.0	99.0	50
304L/316L	10	29	13	12.0	62.0	99.0	99.5	92.0	99.0	60

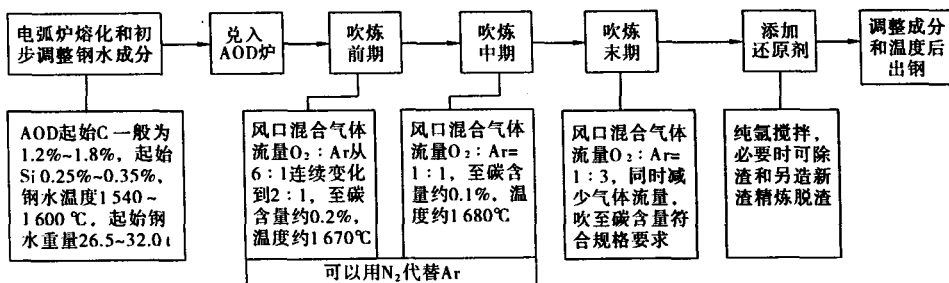


图 1 AOD 智能精炼系统冶炼不锈钢工艺流程

Fig. 1 Flow sheet of AOD intelligent refining system for melting stainless steel

后选择冶炼的阶段,系统将自动按不同冶炼阶段,选择不同比例的情性气体和氧气的混合气体从风口和顶枪同时进行吹炼。操作人员可通过计算机提示加入合金及渣料,达到终点碳后,系统计算还原剂加入量,并进行还原冶炼。

在整个精炼过程中,随着碳含量的降低和钢水温度的升高,氧气与情性气体的比率从6:1连续变化到1:3。在保证成品含氮量的前提下,可最大限度的以 N<sub>2</sub> 代替 Ar。

### 1.1.2 太钢 40 t AOD

1999 年太钢对 18 t AOD 进行改造,先后建成 40 t AOD 3 座,生产能力达到 30~35 万 t/a。

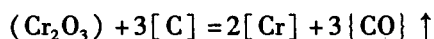
通过提高供氧强度,提高碱度,降低氧化末期温度,控制冷却气体的流量,改善熔池内的物化反应,对传统的氧氮比由过去的 2~3 个台阶,增为 4~6 个,脱碳初期 O<sub>2</sub>/Ar(N<sub>2</sub>)由 3:1 改为 6:1。双渣法操作改为单渣法操作,铬的回收率达到 99%(表 2)。

太钢经过自身工艺的改进和优化,采用了新的工艺和技术,包括吹氩喂 Ti 线工艺;顶侧吹工艺;微机控制炼钢;铁水直接兑入 AOD 炼钢等。

表 3 上钢一厂 120 t AOD 精炼奥氏体不锈钢的经济技术指标

Table 3 Economic-technical indexes of an 120 t AOD unit refining austenite stainless steels at Shanghai No1 Steel

工艺	气体消耗/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )			渣料消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )		耐火材料消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	合金收得率/%				时间/min	
	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	还原硅	石灰		Cr	Ni	Mn	合金总计	吹氧	兑钢至出钢
两步法	12~15	60	11	12~15	75	8~12	97.0	99.0	92.0	93.0	61	82
三步法	4~15	55~65	20	12~15	60	8~12	98.0	99.0	92.0	93.5	40	65



当钢水中含 Cr 18% 温度为 1 705 ℃ 时,与其平衡的碳含量因 CO 的分压不同而异;CO 分压为 0.01 MPa 时,[C] 为 0.05%;CO 分压为 0.10 MPa 时,[C] 为 0.50%。因此,用情性气体 Ar(N<sub>2</sub>) 降低 CO 分压就可以达到降碳保铬的目的,而无须提高温度。

动力学研究认为,脱碳还与碳和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的传递速度有关,特别是钢中碳含量高时,脱碳已不单由 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 来完成,这时脱碳所需的氧主要由吹入的氧气供给。因此,AOD 供气方式已经由最初的 O<sub>2</sub>:Ar(N<sub>2</sub>) 为 3:1、1:1、1:2、1:3,而发展为高碳区主气路供纯氧及多台阶供气方式。

新日铁光制铁所当 [C] ≥ 0.70% 时,在 60 t AOD 采用纯氧气吹炼,温度 ≥ 1 580 ℃ 时,[Cr] 20%,首先氧化碳;当 [C] ≤ 0.70% 时,采用 O<sub>2</sub>:Ar(N<sub>2</sub>) 连续变化方式脱碳;当 [C] ≤ 0.10% 时,用纯氩吹炼,用钢中余氧及渣中的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进一步脱碳。

表 2 太钢 40 t AOD 精炼奥氏体不锈钢的经济技术指标  
Table 2 Economic-technical indexes of 40 t AOD units refining austenite stainless steels at Taiyuan Steel

气体消耗/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )			FeSi 消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	耐火材料消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	合金收得率/%	
O <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>			Cr	Ni
40~45	20	30	20	50~60	97~99	96.5

### 1.1.3 上钢一厂(宝钢不锈钢分公司)120 t AOD

上钢一厂 AOD 引进的是西马克德马格的技术,其主要原料为 EAF 含铬母液,在 AOD 中,进行脱碳保铬处理。当钢液碳含量达到出钢要求时,钢水移至 VOD 或 LF 装置进行精炼,直至达到成品要求。为强化 AOD 在高碳区的快速脱碳功能,AOD 配备了顶部氧枪,并配有副枪进行测温,炉底设置了 7 个侧吹风口,并通过智能精炼系统,使 AOD 的冶炼操作更为方便和准确。AOD 于 2004 年 4 月投入生产,其经济技术指标见表 3。

## 1.2 AOD 精炼技术的发展

### 1.2.1 脱碳工艺的改进

AOD 脱碳按以下化学反应式进行:

新日铁光制铁所采用的这种方法,前期氧利用率与传统方法一致,但脱碳速度得到提高,氧枪没有出现熔损加大的问题,后期氧利用率 CRE 提高 6%,结果使还原剂 FeSi 消耗降低了 0.70 kg/t<sup>[2]</sup>。

### 1.2.2 脱硫工艺的发展

根据普莱克斯/内曼格公司的技术交流资料,按照传统 AOD 操作,脱碳终了加入 FeSi 进行 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的还原操作,然后扒去 85% 以上的渣子再加入 CaO、CaF<sub>2</sub> 及粉状 FeSi 或 CaSi 进行脱硫的精炼操作。这样对成本、精炼时间、操作条件都十分不利。通过采用 Al + FeSi 代替 FeSi 进行脱硫,在实际生产中取得了满意的效果,硫含量可控制在 0.004% 以下,还原精炼时间可缩短 10 min(表 4)。

### 1.2.3 以 N<sub>2</sub> 代 Ar 及供氧强度的提高

不锈钢精炼时用 N<sub>2</sub> 代 Ar 可以较大幅度地降低生产成本,其代 Ar 率达到 20%~40%,对于产品 [N] 为 (400~800) × 10<sup>-6</sup> 的钢,可以在脱碳 1 期、2

表 4 AOD 精炼加 Al + FeSi 与加 FeSi 的脱硫效果比较  
Table 4 Comparison of desulphurization effect between adding Al + FeSi and adding FeSi in AOD refining

脱硫剂	渣料消耗量/(kg·t <sup>-1</sup> )					渣量/ (kg·t <sup>-1</sup> )	氧活度/ 10 <sup>-6</sup>	碱度	Cs(1640℃) × 1000	Ls (硫分配比)	终点硫/ %	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	CaF <sub>2</sub>							
Al + FeSi	8.7	22.1	7.7	6.0	69.6	10.0	115.4	5	0.774	23.57	254	0.0017
FeSi	11.0	26.8	2.0	6.0	64.9	15.0	114.7	5	0.755	12.20	131	0.0031

期用 N<sub>2</sub> 代 Ar; 产品 [N] 要求 (1 500 ~ 2 500) × 10<sup>-6</sup> 的钢, 可以在脱碳期全部用 N<sub>2</sub> 代 Ar; 产品 [N] 要求 3 000 × 10<sup>-6</sup> 的钢, 可以全程用 N<sub>2</sub> 代 Ar<sup>[2]</sup>。经过不断研究, 供氧强度已提高到 1.0 ~ 1.5 m<sup>3</sup>/(min·t), 有顶枪时应 ≥ 2.0 m<sup>3</sup>/(min·t)。供氧强度提高后, 熔池温度的控制, 可采用加入 5% ~ 10% 的冷料, 这样初炼炉 (电弧炉) 的冶炼时间及电耗也得到了改善。

#### 1.2.4 顶枪技术的发展

日本大同特殊钢公司星崎工厂发现, 只有碳生成 CO 再氧化成 CO<sub>2</sub> 时, 其反应热最高, 相对成本最低。于是发明了 AOD 顶枪工艺 (AOD-CB 法), 与传统工艺相比, 升温速度由 7 °C/min 提高到 17.5 °C/min, 氧利用率 CRE 提高 5%, 脱碳速度由 0.055%/min 提高到 0.087%/min, 电耗降低 78 kWh/t, 还原剂 FeSi 减少 25%, 冶炼时间减少 11 min<sup>[2]</sup>。

顶吹工艺有“硬吹”和“软吹”2 种方式, “硬吹”就是通过顶枪吹入的氧 100% 同熔池反应; “软吹”就是通过顶枪吹入的氧, 约 60% 同熔池反应, 40% 与 CO 进行二次燃烧成 CO<sub>2</sub>。“硬吹”工艺比传统的 AOD 工艺可缩短脱碳时间 44%。“软吹”可缩短 31%, 而且由于它能产生附加热能并传递给熔池, 还可以提高废钢加入量, 降低 FeSi 消耗及电弧炉出钢温度<sup>[3]</sup>。

## 2 AOD 精炼工艺面临的问题

### 2.1 供气形式的完善

AOD 是通过侧吹喷枪向钢水中吹入氩气等混合气体, 降低产物 CO 的分压, 从而实现脱碳保铬。当钢水中碳含量较高时, 脱碳不能仅靠 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 来完成, 这时脱碳所需的氧主要由吹入的氧气供给; 当钢中碳含量降到一定程度后, 脱碳所需的氧量减少了, 此时应减少氧气吹入量, 避免剩余的氧氧化钢中的铬; 同时需加大惰性气体的比例, 以进一步降低 CO 分压, 减少铬元素的氧化, 促进脱碳反应的进行。通过建立数学模型, 可以根据原材料的条件, 计算出合适的供气量和气体比例, 为优化不锈钢 AOD 精炼的

控制, 提供了有用的信息和可靠的基础。

### 2.2 炉衬寿命的提高

AOD 精炼炉的最大不足之处是炉衬寿命短。AOD 炉衬的寿命是温度与精炼时间的函数。若氧化末期温度在 1 720 °C 左右, 炉龄就与时间成反比。因此, 国外在控制温度、炉渣碱度的同时尽力缩短精炼时间。南韩浦项公司采用 AOD-CB 法, 将精炼周期缩短为 60 min, 平均炉龄由原来的 50 次提高到 240 次<sup>[2]</sup>。

另外, AOD 过程中出现的喷枪及其附近耐火材料的过量蚀损, 在一定程度上与这种水平浸没式气体射流所出现的反冲有很大关系。现有的研究结果表明, 提高喷吹压力, 采用扁平型、微孔组合型或螺旋型等截面喷枪, 减小套管式喷枪的环缝 (副枪) 宽度等, 均可以在不同程度上降低反冲频率。通过实验结果表明, AOD 工艺中多枪喷吹时, 喷枪吹气量、喷枪间的夹角以及喷枪结构, 都会影响熔池内流体流动和射流对炉衬的蚀损<sup>[4,5]</sup>。

## 3 结语

随着 AOD 精炼不锈钢工艺的不断应用, 以及对 AOD 精炼不锈钢工艺的数学模拟和物理模拟的深化研究和完善, 能逐步解决氩耗高和炉衬寿命短等难题, 对于工业应用的潜力将是巨大的。

### 参考文献

- 1 张向娟, 陈伟忠, 汪文钦. 浦钢 30 t AOD 智能精炼系统和生产实践. 宝钢技术, 2002(5): 4
- 2 郭家祺, 刘明生. AOD 精炼不锈钢工艺发展. 炼钢, 2002, 18(2): 52
- 3 林企增, 张继猛. 不锈钢生产技术的新发展. 特殊钢, 1999, 20(5): 7
- 4 魏季和, 马金昌, 樊养颐, 等. 水平浸没式喷吹气体射流反冲现象及其对炉衬蚀损的影响. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(3): 207
- 5 魏季和, 马金昌, 樊养颐, 等. 旋转气流下 AOD 熔池内流体流动和混合特性的水模拟研究. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(3): 215

刘 闯 (1976-), 男, 工程师, 1998 年武汉冶金科技大学毕业, 从事钢铁工艺设计及冶金工厂工程设计。

收稿日期: 2006-08-08