

## 精炼渣的组成对管坯钢 SA-210C 洁净度的影响

阮小江<sup>1</sup> 张广军<sup>2</sup> 黄煌<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 江阴兴澄特种钢铁有限公司,江阴 214429)

**摘要** 经熔渣粘度和表面张力影响因素的分析并通过正交试验得出优选的管坯钢 SA-210C (0.18 ~ 0.24C, 0.80 ~ 1.10Mn) LF 精炼渣组成 (%): 52CaO, 18Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 16SiO<sub>2</sub>, 9MgO, 5CaF<sub>2</sub>。该渣的粘度和表面张力分别为 0.72 Pa·s 和 0.43 N/m。100 t LF 使用优选精炼渣的 94 炉生产数据表明,精炼后钢液中的显微夹杂数量与大颗粒夹杂含量比优选前分别降低了 22.6% 和 35.4%。洁净度合格炉数由原 96.8% 提高到 98.1%。

**关键词** 管坯钢 SA-210C LF 精炼渣 夹杂物

## Effect of Ingredient of Refining Slag on Cleanliness of Tube Blank Steel SA-210C

Ruan Xiaojiang<sup>1</sup>, Zhang Guangjun<sup>2</sup> and Huang Huang<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Jiangyin Xingcheng Iron and Steel Co Ltd, Jiangyin 214429)

**Abstract** The optimum LF refining slag - 52CaO, 18Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 16SiO<sub>2</sub>, 9MgO, 5CaF<sub>2</sub> for tube blank steel SA-210C (0.18 ~ 0.24C, 0.80 ~ 1.10Mn) has been obtained according to analysis on influence factors on fluxes viscosity and surface tension and by orthogonal test of which the viscosity and surface tension are 0.72 Pa·s and 0.43 N/m respectively. The 94 heats production data using optimum refining slag in an 100 t LF indicated that the micro inclusion amount and large inclusion content in molten steel after refining decreased by 22.6% and 35.4% respectively as compared that of using original refining slag, and the qualified heat rate for cleanliness increased to 98.1% from original 96.8%.

**Material Index** Tube Blank Steel SA-210C, LF Refining Slag, Inclusion

### 1 实验钢中夹杂物的组成

SA-210C 是应用于亚临界、超亚临界锅炉水冷壁、省煤器等受热部件的高压管坯钢,目前已成为用量最多的高压锅炉管钢种。与 20G 相比,其强度高、塑性好,可以降低管壁厚、降低煤耗和提高锅炉热效率。产品标准为 ASMESA-210/SA-210M<sup>[1,2]</sup>,其化学成分 (%) 要求为: 0.18 ~ 0.24C、0.17 ~ 0.37Si、0.80 ~ 1.10Mn、≤0.015P、≤0.010S。

SA-210C 作为高压管坯钢,对热加工性能和冶金洁净度有很高的要求,尤其是钢洁净度的高低对轧管表面质量和钢管使用性能有很大的影响。该钢高倍检验按 GB/T10561-2005 标准评级, A、B、C、D 各类夹杂物级别应分别 ≤2.0 级,且 A + B + C + D ≤5.0 级,各类夹杂物要求级别及对应的最大尺寸见表 1。

表 1 管坯钢 SA-210C 夹杂物要求级别及对应尺寸

Table 1 Requirement of rating and corresponding size of inclusion in tube blank steel SA-210C

项目	A	B	C	D	D <sub>s</sub>
最大级别	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
尺寸/μm	648	554	509	(24 个)	52

为提高该钢的冶金洁净度,在精炼过程中要做好脱氧、脱硫工作。兴澄公司电弧炉出钢量为 100 ~ 110 t,包括精炼补加渣料及脱氧产物,钢包内总渣量为钢水量的 2.0% ~ 2.5%。在精炼过程中,沉淀脱氧通过加铝块或喂铝线完成,扩散脱氧采用漂撒碳粉或碳化硅粉完成,尽早形成白渣并保持精炼。精炼结束进行真空脱气处理,VD 高真空度通常在 67 Pa 以下,高真空保持时间 ≥20 min。正常情况下硫含量最终可降至 0.005% 左右。

在该钢生产过程中,发现个别炉号、个别坯段有大型非金属夹杂物产生,经扫描电镜分析常见夹杂物的成分组成主要有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO 等氧化物,其中尤以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 最多,约占夹杂物总量的 65%。经分析认为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是由于用铝脱氧生成的大量絮状小颗粒夹杂不能充分上浮被渣俘获,以及精炼渣中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进入钢液中形成的,这些 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与钢液或渣中的 CaO、MgO 等氧化物结合,在非稳态浇注等条件下残留在钢中,形成大型非金属夹杂物。实验从精炼渣组分方面进行研究,结合实际情况,优化该钢的渣系,以提高 SA-210C 的钢液洁净度。

## 2 精炼渣的优选实验

### 2.1 熔渣粘度和表面张力的影响因素

CaF<sub>2</sub> 能提供使复合阴离子解体的 F<sup>-</sup> 离子, 又能使高熔点氧化物如 CaO、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 形成低熔点共晶体, 提高熔渣的均匀性, 并使粘度得以降低; 碱性渣中提高 CaO、MgO 的含量将提高熔渣粘度; 随 SiO<sub>2</sub> 含量的提高, 熔渣粘度也将提高; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 主要来源于原料和脱氧产物, 渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量低于 20% 时, 随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加, 炉渣粘度降低, 促进渣钢反应。在 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 渣系中, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组分在 15% ~ 35% 之间时, 随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加, 渣粘度提高<sup>[3,4]</sup>。

虽然渣子的熔点也会影响其在精炼温度下的流动性, 但最终也是以粘度形式表现, 所以实验中只测定粘度。在精炼温度下, 熔渣的粘度在 0.3 ~ 1.5 Pa·s 之间为宜。

当  $\sigma_{m-1} > \sigma_{m-s} > \sigma_{s-1}$  时, 夹杂物容易被熔渣所同化吸收<sup>[5]</sup>。式中  $\sigma_{m-1}$ 、 $\sigma_{m-s}$  和  $\sigma_{s-1}$  分别是钢液-夹杂物、钢液-熔渣和熔渣-夹杂物间的界面张力, 从此式也可以看出降低熔渣表面张力有利于使钢渣界面上的氧化物夹杂自发转入渣相中。

CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 可以增大熔渣的表面张力, 但是在 CaO 含量很高时, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的增加反而会降低表面张力; CaF<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 能使熔渣的表面张力有很大的降低<sup>[4]</sup>。在精炼温度下, 熔渣的表面张力在 0.30 ~ 0.50 N/m 之间为宜。

### 2.2 精炼渣的组成确定

电弧炉出钢后, 从钢包到 LF 工位, 为了快速形成流动性良好的精炼渣, 需要配入一定量的 CaF<sub>2</sub>, 考虑到 CaF<sub>2</sub> 在实际精炼过程中要分解挥发掉大部分, 所以确定精炼终渣和实验渣中的 CaF<sub>2</sub> 含量为 5%。

由于渣料带入、脱氧形成以及炉衬侵蚀, 所以精炼渣中含有 MgO, 通常镁碳质钢包炉精炼渣饱和 MgO 含量为 7% ~ 11%, 所以确定实验精炼渣中的 MgO 含量为 9%。

为了促进精炼脱氧和脱硫, 精炼渣中必须含有最多量的 CaO; 钢中含硫低时,  $\sigma_{m-1}$  会增大, 有利于钢液中夹杂物的析出, 实验中确定 CaO 含量为

45% ~ 60%。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 主要来源于原料和脱氧产物, 是精炼渣的主要组分, 二者在精炼渣中的含量往往呈现出此消彼涨的规律, 主要是由于 Al 能还原 SiO<sub>2</sub> 造成的。二者的含量范围确定为 10% ~ 20%。

### 2.3 精炼渣优选实验

根据上面分析, 固定实验中 CaF<sub>2</sub> 和 MgO 含量, 将 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 含量作为 3 个独立因素, 每个因素安排 3 个水平 (见表 2), 进行 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交实验。使用化学纯试剂混制配方, 测定每组配方的粘度和表面张力值, 然后根据测定数据范围, 为每个配方综合评分, 通过极差分析法优选出实验中具有最佳综合性能的精炼渣配方, 其成分及性能见表 3。实验中用旋转柱体法测粘度; 用拉筒法测表面张力。精炼渣性能实验测定温度确定为 1 500 °C。

表 2 精炼渣因素水平表/%

Table 2 Level of factors for refining slag / %

水平	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
1	48	10	12
2	52	14	16
3	56	18	20

表 3 优选精炼渣成分及性能

Table 3 Ingredient and properties of optimum refining slag

成分/%					粘度/ (Pa·s)	表面张力/ (N·m <sup>-1</sup> )
CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaF <sub>2</sub>		
52	18	16	9	5	0.72	0.43

## 3 工业试验及结果分析

### 3.1 试验方案

根据以上分析, 在管坯钢 SA-210C 的生产现场进行了工业试验。具体操作是控制电弧炉出钢液自由氧含量在 0.03% ~ 0.07% 范围内, 首先计算出脱氧过程碳、硅和铝等脱氧剂用量以及脱氧产物生成量, 然后确定电弧炉出钢需加的各种顶渣料配比和用量, 以使精炼终渣成分接近优选精炼渣成分 (表 3), 表 4 为 SA-210C 钢 100 t LF 精炼结束时优选前后精炼终渣的成分范围。

表 4 优选前后 SA-210C 钢 LF 精炼终渣成分/%

Table 4 Ingredient of end refining slag in LF for steel SA-210C before and after optimization / %

项目	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	MnO	S
优选后	13.4 ~ 19.6	48.7 ~ 55.3	15.8 ~ 22.3	7.9 ~ 10.8	0.15 ~ 0.42	0.15 ~ 0.27	0.91 ~ 1.59
优选前(原精炼渣)	12.3 ~ 25.6	49.7 ~ 62.4	9.2 ~ 16.6	6.7 ~ 10.3	0.18 ~ 0.46	0.14 ~ 0.37	1.27 ~ 1.77

### 3.2 试验结果分析

从表 4 数据可以看出,试验过程精炼渣成分接近实验配方成分。冶炼过程钢包顶渣熔化均匀、成渣迅速,精炼渣流动性良好,所有炉次都能在 30 min 内将钢液中硫含量降至 0.010% 以下,精炼过程顺利。

为了检验该渣系对 SA-210C 钢液中非金属夹杂物的吸收情况,取钢包炉钢液试样进行夹杂物定量分析。对  $< 50 \mu\text{m}$  的显微夹杂,采用金相统计分析,把不同尺寸的夹杂物折合成尺寸为  $5 \mu\text{m}$  的夹杂个数(个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ );  $> 50 \mu\text{m}$  的大颗粒夹杂,采用大样电解分析 [ $\text{mg}\cdot(10\text{kg})^{-1}$ ]。将 5 炉检验平均结果与优选试验以前的 SA-210C 钢包炉钢液中的 5 炉检验平均夹杂物含量进行对比,见表 5。

表 5 精炼渣优选前后钢中夹杂物含量变化

Table 5 Change of inclusion content in steel before and after optimization of slag

项目	显微夹杂含量/ (个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ )	大颗粒夹杂/ [ $\text{mg}\cdot(10\text{kg})^{-1}$ ]
原精炼渣	8.4	4.27
优选精炼渣	6.5	2.76

从表 5 的检验结果可以看出,显微夹杂数量和大颗粒夹杂含量与优选以前相比分别下降了 22.6% 和 35.4%,说明优选渣系对于降低 SA-210C 钢中的非金属夹杂物含量发挥了有效作用。

2005 年 9 ~ 12 月在生产管坯钢 SA-210C 时没有控制精炼渣成分,共计生产 76 炉,按 GB/T10561-2005 标准进行高倍检验,超过表 1 规定级别的炉数比例为 3.2%; 2006 年 1 ~ 5 月生产时,按照优选精炼渣成分进行了控制,共计生产 94 炉,超过表 1 规定级别的炉数比例下降到 1.9%,这说明了优选渣系对于提高 SA-210C 钢冶金洁净度有明显作用。

### 4 结论

(1) 管坯钢 SA-210C 大型非金属夹杂物的产生,是钢液中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与钢液或渣中的  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  等氧化物结合,在非稳态浇铸等条件下残留在钢中形成的。

(2) 熔渣的粘度和表面张力是吸附钢液中夹杂物最重要的两个指标;在精炼温度下,熔渣的粘度和表面张力数值分别在  $0.3 \sim 1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $0.30 \sim 0.50 \text{ N/m}$  之间为宜。

(3) 适合管坯钢 SA-210C 精炼的实验优选渣成分(%)为:  $52\text{CaO}$ 、 $18\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $16\text{SiO}_2$ 、 $9\text{MgO}$ 、 $5\text{CaF}_2$ ,其粘度和表面张力数值分别为  $0.72 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $0.43 \text{ N/m}$ 。

(4) 用优选精炼渣成分指导工业生产,使钢包炉钢液中显微夹杂数量和大颗粒夹杂含量与优选前相比下降了 22.6% 和 35.4%,超过标准级别的炉数比例也由以前的 3.2% 下降到 1.9%,管坯钢 SA-210C 的冶金洁净度有明显提高。

### 参考文献

- 1 张少波,胡皆如. SA-210C 高压锅炉用无缝钢管的开发. 江西冶金,2005,25(4):15
- 2 陈绍林. SA-210C 高压锅炉管的产品开发. 湖南冶金,2005,33(6):36
- 3 张旭升,关勇,吕春风,等. 新型 LF 炉精炼渣的研制与应用. 鞍钢技术,2006(2):34
- 4 黄希祐. 钢铁冶金原理. 北京:冶金工业出版社,1990
- 5 陆钢,牛四通,黄钢汉,等. 多功能调渣剂的开发与应用. 包头钢铁学院学报,2001,20(4):318

阮小江(1968-),男,高级工程师,在读博士研究生,从事连铸和炼钢工艺研究。

收稿日期:2006-09-02

## 下 期 要 目

20CrMnTiH 圆钢精轧后控冷过程温度场有限元分析 .....	洪慧平等
废钢-电弧炉流程和铁水 + 废钢-电弧炉流程工序能耗的数学模拟 .....	仇晓磊等
宽板坯连铸结晶器内钢液流动的数值模拟 .....	沈巧珍等
热轧冷却工艺对 Nb-Ti 微合金双相钢组织和性能的影响 .....	陈连生等
CAS 喷粉精炼熔池混合行为的水模型试验 .....	赵成林等
W、Mo、Nb 对超低碳耐火钢组织和持久性能的影响 .....	方剑等
固溶温度对改型 Inconel 718 合金组织和性能的影响 .....	吴艳阳等
FTSR 薄板坯内部横裂纹形成机理的分析和预防措施 .....	张春梅等