

# 100 t EAF-LF-VD Φ500 mm 连铸坯流程高压锅炉用 钢 SA-210A1 生产实践

刘 鹏

(山钢股份莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105)

**摘 要** 生产的高压锅炉用钢 SA-210A1 (/%: 0.08 ~ 0.11C, 0.22 ~ 0.24Si, 0.72 ~ 0.74Mn, 0.007 ~ 0.010P, 0.004 ~ 0.005S, 0.010 ~ 0.015V, 0.025 ~ 0.035Ti, 0.012 ~ 0.018Alt) 的冶金工艺流程为 55% 铁水 + 废钢-100 t EAF-LF-VD Φ500 mm 坯连铸-轧制成 Φ130 mm 圆钢。通过低铝脱氧工艺- EAF 终点控制 [C] ≤ 0.06%, [P] 0.006% ~ 0.010%, 出钢加石灰 12 kg/t, AD 粉 (/%: 10 ~ 13Al, 55 ~ 60Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5 ~ 8SiO<sub>2</sub>, 5 ~ 8MgO) 3 kg/t, 70% Al 钢芯铝 3 kg/t 预脱氧; LF 采用 5.76 ~ 6.06 高碱度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系, LF 终点喂 0.40 kg/t 钙线, 软吹 ≥ 10 min; 中间包钢水过热度 15 ~ 25 °C, 连铸结晶器和末端电磁搅拌, 拉速 0.31 ~ 0.32 m/min, 铸坯缓冷 ≥ 48 h 等工艺措施, SA-210A1 钢中的 [O] 16 × 10<sup>-6</sup> ~ 24 × 10<sup>-6</sup>, [N] 65 × 10<sup>-6</sup> ~ 80 × 10<sup>-6</sup>, [Alt] ≤ 0.020%, 铸坯和热轧圆钢低倍组织和非金属夹杂物均满足要求。

**关键词** 高压锅炉用钢 SA-210A1 100 t EAF-LF-VD Φ500 mm 坯连铸 低铝脱氧工艺 高碱度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系 生产实践

## Commercial Production Practice of Steel SA-210A1 for High Pressure Boiler by 100 t EAF-LF-VD Φ500 mm Bloom Casting Flowsheet

Liu Peng

(Special Steel Department, Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Corp Ltd, Laiwu 271105)

**Abstract** The metallurgical process flowsheet of produced steel SA-210A1 for high pressure boiler (/%: 0.08 ~ 0.11C, 0.22 ~ 0.24Si, 0.72 ~ 0.74Mn, 0.007 ~ 0.010P, 0.004 ~ 0.005S, 0.010 ~ 0.015V, 0.025 ~ 0.035Ti, 0.012 ~ 0.018Alt) is 55% hot metal + scrap- 100 EAF-LF-VD-Φ500 mm bloom casting-hot rolling to Φ130 mm Round bar. With the process measures including low aluminium deoxidation process- EAF end controlling [C] ≤ 0.06% and [P] 0.006% ~ 0.010%, adding lime 12 kg/t, AD powder (/%: 10 ~ 13Al, 55 ~ 60Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5 ~ 8SiO<sub>2</sub>, 5 ~ 8MgO) 3 kg/t and 70% Al aluminium cable steel 3 kg/t in tapping liquid for pre-oxidation; using 5.76 ~ 6.06 high basicity Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag series in LF refining, feeding 0.40 kg/t calcium wire at end of LF and sift stirring for ≥ 10 min; super-heating extent of liquid in tundish 15 ~ 25 °C, using mold and end electromagnetic stirring process in casting, casting speed 0.31 ~ 0.32 m/min and casting bloom slow cooling for ≥ 48 h, the steel SA-210A1 steel [O] is 16 × 10<sup>-6</sup> ~ 24 × 10<sup>-6</sup>, [N] is 65 × 10<sup>-6</sup> ~ 80 × 10<sup>-6</sup> and [Alt] is ≤ 0.020%, the macrostructure and nonmetallic inclusions in casting bloom and hot-rolled round bar all meet the requirements.

**Material Index** Steel SA-210A1 for high pressure boiler, 100 t EAF-LF-VD-Φ500 mm Bloom Casting, Low Aluminium Deoxidation Process, High Basicity Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Slag Series, Production Practice

SA-210A1 是 ASME SA-210/SA-210M 标准碳钢无缝钢管,具有良好的焊接性;主要用于锅炉受热面等高温环境。其用途决定了管坯钢要求钢质纯净,组织均匀,具有良好的冷、热加工性能<sup>[1]</sup>。山东钢铁公司莱钢特钢事业部采用大断面连铸工艺进行了 SA-210A1 大规格热轧圆管坯的工业试制,并实现了批量生产。

### 1 主要技术难点

#### 1.1 化学成分控制

用户要求 SA-210A1 钢的 C 含量在 0.08% ~ 0.13%, 合金含量少,同时对五害元素及铝含量、气体含量提出了要求,详见表 1。由于 SA-210A1 钢碳、磷含量要求较低,电弧炉出钢时要将钢水中的

表 1 SA-210A1 钢化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of steel SA-210A1 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Alt
判定	0.08 ~ 0.13	0.17 ~ 0.37	0.68 ~ 0.83	≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.25	≤ 0.20	≤ 0.15	≤ 0.20	≤ 0.008	≥ 0.012	≤ 0.020
内控	0.09 ~ 0.11	0.22 ~ 0.30	0.72 ~ 0.77	≤ 0.012	≤ 0.006	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.15	≤ 0.050	0.022 ~ 0.040	0.010 ~ 0.020

注:协议要求(%) : As + Sn + Pb + Sb + Bi ≤ 0.035%, O ≤ 40 × 10<sup>-6</sup>, N ≤ 80 × 10<sup>-6</sup>, H ≤ 1.5 × 10<sup>-6</sup>。

碳、磷脱到极低的水平,钢水过氧化严重;钢水成分对铝含量有上限要求限制了铝脱氧剂的用量,脱氧难度较大;另外,莱钢特钢 100 t 电弧炉使用的全部为社会废钢,故废钢种类较多,质量波动大,导致钢中五害元素含量波动较大。

### 1.2 钢水温度控制

SA-210A1 钢碳含量低、合金含量较少,液相线温度为 1 521 °C,为满足 VD 脱气精炼温降及连铸开浇温度要求(1 615 ± 5) °C,LF 第 1 炉出钢时钢水温度必须达到 1 700 °C 以上,其余炉次出钢温度达到 1 670 °C。过高的钢水温度会增加送电提温时间并加剧对钢包耐火材料的侵蚀,给钢包带来严重安全隐患,同时送电过程增碳,也增加了碳成分控制难度。

### 1.3 钢的洁净度

SA-210A1 为控铝管坯钢,钢水脱氧不充分,夹杂物含量高。A 类夹杂物随着轧制方向延伸,造成各向异性,对横向冲击影响较大;B 类夹杂物具有尖锐的棱角<sup>[2]</sup>,降低锅炉钢高温疲劳性能;此外,钢水成分含有一定量的 Ti, TiN 类夹杂含量高于非含 Ti 钢种。用户要求 A、B、C、D、Ds 类非金属夹杂物评级不大于 2.0 级,同时(A + B + C + D)类非金属夹杂物不大于 5.0 级。

## 2 工艺控制要点及技术措施

生产工艺流程为:废钢 + 热装铁水(或生铁块) → 100 t 电弧炉 → 双工位 120 t LF → 120 t VD → 大圆坯连铸(Φ500 mm 断面) → 步进式加热炉 → 950 轧机轧制 → Φ130 mm 圆钢 → 精整扒皮检验。

### 2.1 电弧炉冶炼工艺

电弧炉冶炼采取炉内留钢、留渣操作,入炉原料采取废钢 + 热装铁水,铁水比 50% ~ 60%,总装入量(125 ± 5)t。通过合理的供电制度,冶炼全程采取留渣操作,增加氧气流量来快速脱碳、脱磷,快速达到温度和成分的双命中。钢水终点成分实际控制(/%)为:≤0.06C、0.006 ~ 0.010P。出钢过程采取石灰(12 kg/t<sub>钢</sub>)、AD 粉(%:10 ~ 13Al、55 ~ 60Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、5 ~ 8SiO<sub>2</sub>、5 ~ 8MgO)(3 kg/t<sub>钢</sub>)、含铝 70% 钢芯铝(3 kg/t<sub>钢</sub>)进行预脱氧。合金化为控制合金增碳采用硅锰合金、硅铁、金属锰。

### 2.2 精炼及温度控制工艺

LF 到位后采用低电压高电流档位快速通电化渣提温并通过补加调渣剂调整炉渣粘度,LF 通电 ≥ 30 min 白渣保持 ≥ 25 min 后取样全分析一次样。根据一次样分析结果,按内控要求调整 C、Si、Mn、

Ti 等成分含量,其中 C 含量按照质量计划成分判定下限 0.08% 控制。LF 出钢前,喂入 0.40 kg/t<sub>钢</sub> 纯钙线钙处理,软吹时间 ≥ 10 min 后调整温度出站。LF 出站后扒除 1/2 ~ 1/3 精炼渣进入 VD 真空脱气处理。真空处理参数为:氩气流量 150 × 2 L/min,真空度 ≤ 133 Pa 保持时间 ≥ 15 min,总处理时间 ≥ 25 min。

为了减轻高温对镁碳砖的侵蚀,LF 采用高碱度高铝渣系(表 2)。当炉渣碱度一定时,MgO 在钢渣中的溶解度会随着温度的增加而明显增大,特别是温度在 1 300 ~ 1 800 °C 时,MgO 在渣中的溶解度呈线性上升(渣图集)<sup>[2]</sup>。当温度高达 1 700 °C 时,砖衬中的 MgO 更易于溶解至钢渣中,进而也加速了渣线的侵蚀速率<sup>[3]</sup>。因此,LF 第 1 炉出钢温度 1 670 ~ 1 680 °C,VD 破真空后回 LF 提温,为减轻提温过程增碳,禁止在渣面加含碳钢包覆盖剂,回 LF 提温过程加入少量铝粒替代含碳脱氧材料以保持炉渣还原气氛,防止钢液二次氧化;正常炉次 LF 出站温度 ≤ 1 680 °C 可满足工艺要求。

钙处理后钢中存在较大尺寸的夹杂物,生产中一般采用软吹操作对钢水进行弱搅拌净化处理,吹入的氩气泡可为钢中显微夹杂物提供黏附的基体,使之黏附在气泡表面随气泡一起上浮排入渣中的理论<sup>[4]</sup>以及李强等人在软吹对夹杂物去除方面的实际研究<sup>[5]</sup>结合实际生产组织情况,采取了 VD 上连铸前较大氩气流量软吹 10 min、小氩气流量软吹 10 ~ 20 min 的分段软吹模式,提高了夹杂物去除能力,钢水可浇铸性良好。

### 2.3 大圆坯连铸

连铸过程采用整体水口保护浇铸,铸坯断面 Φ500 mm。SA-210A1 钢液相线温度为 1 521 °C,中间包过热度控制在(20 ± 5) °C;中间包采用中包专用无碳覆盖剂,结晶器采用低碳包晶钢专用保护渣;结晶器电磁搅拌为 250 A、1.5 Hz,末端电磁搅拌为 120 A、2.0 Hz。本钢种为典型的低碳包晶钢,易产生裂纹,二冷制度采用结晶器水流量 4 700 L/min,足辊水流量前期 10 L/min,后期 20 L/min,活动段水流量前期 5 L/min,后期 25 L/min 弱冷控制;拉速

表 2 LF 精炼顶渣成分和碱度  
Table 2 Ingredient and basicity of LF refining top slag

炉号	渣的成分 / %							碱度 (R)	
	ΣFe	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S		
17-05102	0.50	8.51	9.70	51.61	33.83	0.32	0.348	0.006	6.06
17-05103	0.62	8.97	8.77	52.32	29.82	0.27	0.365	0.016	5.83
17-05104	0.58	8.38	10.57	48.23	38.71	0.27	0.357	0.006	5.76

表3 SA-210A1 钢分析成分/%  
Table 3 Analysis of steel SA-210A1 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Al <sub>t</sub>
0.08 ~ 0.11	0.22 ~ 0.24	0.72 ~ 0.74	0.007 ~ 0.010	0.004 ~ 0.005	0.04 ~ 0.07	0.01 ~ 0.03	0.01 ~ 0.02	0.05 ~ 0.07	0.010 ~ 0.015	0.025 ~ 0.035	0.012 ~ 0.018

实际分析(%): As 0.006 ~ 0.008, Sn 0.003 ~ 0.005, Sb 0.001 ~ 0.002, Pb 0.000 2, Bi 0.000 3 ~ 0.000 9。

表4 SA-210A1 钢  $\Phi$ 500 mm 铸坯低倍检验结果/级  
Table 4 Macrostructure examination results of  $\Phi$ 500 mm casting bloom of steel SA-210A1 /rating

项目	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下气泡、皮下裂纹
标准	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.0
检验值	0~1.5	0.5~1.0	0	0	0

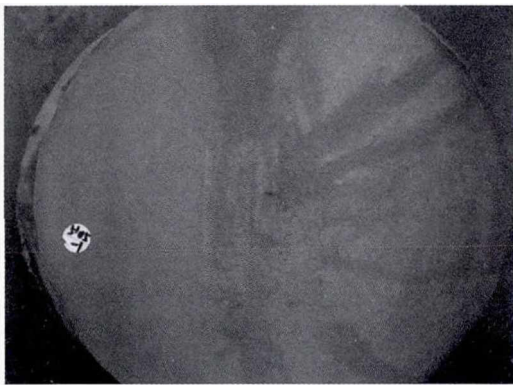


图1 SA-210A1 钢  $\Phi$ 500 mm 铸坯低倍形貌

Fig. 1 Morphology of macrostructure of  $\Phi$ 500 mm casting bloom of steel SA-210A1

表5 SA-210A1 钢  $\Phi$ 130 mm 热轧材低倍检验结果/级  
Table 5 Macrostructure examination results of  $\Phi$ 130 mm hot-rolled product of steel SA-210A1 /rating

项目	一般疏松	中心疏松	偏析	一般点状偏析	边缘点状偏析
标准	≤2.0	≤2.0	≤2.0	不允许有	不允许有
检验值	1.0	1.5	0.5	0	0

注:非金属夹杂物 A 类 1.0~1.5 级, B 类 0.5~1.0 级, C 类 0.5~1.5 级, D 类 0.5~1.0 级, D<sub>s</sub> 类 1.0~1.5 级, (A+B+C+D) 类 3.5~4.0 级;晶粒度为 7.5~8.0 级;低倍一般疏松均为 0.5 级,中心疏松为 1.0~1.5 级,符合标准要求。

控制在 0.31~0.32 m/min。铸坯入缓冷坑缓冷,时间 ≥48 h,出坑时铸坯表面温度 ≤200 ℃。

#### 2.4 圆钢的轧制及精整

采用 950 轧机线进行轧制,主要轧制规格为  $\Phi$ 130 mm,铸坯的加热段温度控制在 1 190~1 280 ℃,均热段温度控制在 1 210~1 250 ℃,总加热时间应大于 6.5~7.5 h,控制开轧温度 1 120~1 180 ℃,终轧温度 920~1 010 ℃。钢材缓冷,入缓冷坑温度大于 500 ℃,缓冷时间大于 24 h,小于 200 ℃出缓冷坑。

圆钢精整扒皮后,进行人工检查,必要时进行人工修磨。

### 3 实验结果

#### 3.1 化学成分和气体含量

通过表 1 和表 3 的对比可知,莱钢特钢 100 t 电弧炉生产的 SA-210A1 钢化学成分控制稳定,残余元素均控制在协议要求之内。

SA-210A1 钢成品氧、氮、氢含量分别为:  $16 \times 10^{-6}$  ~  $24 \times 10^{-6}$ 、 $65 \times 10^{-6}$  ~  $80 \times 10^{-6}$ 、 $0.8 \times 10^{-6}$  ~  $1.1 \times 10^{-6}$ ,其中氧、氮、氢从  $\Phi$ 130 mm 热轧圆钢半径 1/2 处取样检测。

#### 3.2 铸坯低倍及轧材物理性能

铸坯和圆钢内部质量控制良好,低倍检验结果完全满足质量计划要求,见表 4 和表 5。

### 4 结论

(1) 采用铁水 + 废钢 → 100 t 电弧炉 → 双工位 LF → 双工位 VD → 圆坯连铸 ( $\Phi$ 500 mm 断面) → 步进式加热炉 → 950 轧机轧制流程生产的 SA-210A1 钢,化学成分、低倍、表面质量以及非金属夹杂物评级等各项指标均满足用户协议要求,工艺设计合理可行。

(2) 用低铝脱氧工艺与 LF 的高铝渣系配合的技术生产的 SA-210A1 钢,全铝含量及非金属夹杂物评级能够满足用户协议要求。

(3) 用低铝脱氧工艺及 LF 扩散脱氧方式生产的 SA-210A1 钢, [O] 为  $16 \times 10^{-6}$  ~  $24 \times 10^{-6}$ , [N] 为  $65 \times 10^{-6}$  ~  $80 \times 10^{-6}$ 。

#### 参考文献

- [1] 张广军,陈玉辉.管坯钢夹杂物成因分析及工艺控制[J].炼钢,2006,22(6):1-4.
- [2] 王俭,彭育强,毛裕文.渣图集[M].北京:冶金工业出版社,1989:102-106.
- [3] 周同军,刘军占,罗辉.40 t 钢包渣线侵蚀研究与改进[J].宝钢技术,2016(3):27-31.
- [4] 赵沛.炉外精炼及铁水预处理实用技术手册[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [5] 李强,王建,王新华,等.X80 管线钢钙处理后吹时间对夹杂物行为的影响[J].钢铁钒钛,2011,32(2):75-77.

刘鹏(1983-),男,工程师,2007 年安徽工业大学(本科)毕业,特殊钢生产工艺研究。E-mail:273786163@qq.com

收稿日期:2017-11-30