

100 t LF Si-Ca 脱氧低铝锅炉管用钢 15CrMoG 夹杂物分析

吴明洋

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105)

摘要 高压锅炉管用钢 15CrMoG ($\%: 0.12 \sim 0.18\text{C}, 0.17 \sim 0.35\text{Si}, 0.40 \sim 0.70\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.015\text{S}, 0.80 \sim 1.10\text{Cr}, 0.40 \sim 0.55\text{Mo}, \leq 0.020\text{Alt}$) 的生产工艺流程为 60% 铁水 + 优质废钢-100 t UHP EAF-LF-VD- $\Phi 500$ mm 坯连铸-轧制。通过电弧炉出钢 Al-Si 预脱氧, LF 精炼 Si-Ca 脱氧, 优化精炼渣系的组成为 ($\%: 55 \sim 60\text{CaO}, 30 \sim 35\text{Al}_2\text{O}_3, 5 \sim 10\text{SiO}_2, (\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.41 \sim 1.74$, 精炼后钢水中的 Alt 为 0.011% ~ 0.014%。 $\Phi 140$ mm 和 $\Phi 160$ mm 热轧材的夹杂物分析结果表明, 钢中夹杂物中 MnS 为 10%, 铝酸钙为 75%, SiO_2 7.5%, 含 Ti 氧化物 5%, 其它 2.5%, 钢中 $\leq 5.0 \mu\text{m}$ 夹杂物占 95% 以上, 满足锅炉管用钢 15CrMoG 的技术要求。

关键词 高压锅炉管用钢 15CrMoG EAF-LF-VD- $\Phi 500$ mm 坯连铸 低铝 Si-Ca 脱氧 夹杂物

Analysis on Inclusions in Low Aluminium Steel 15CrMoG for Boiler Pipe Refining in 100 t LF by Si-Ca Deoxidation

Wu Mingyang

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

Abstract The production process flowsheet of steel 15CrMoG for high pressure boiler pipe ($\%: 0.12 \sim 0.18\text{C}, 0.17 \sim 0.35\text{Si}, 0.40 \sim 0.70\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.015\text{S}, 0.80 \sim 1.10\text{Cr}, 0.40 \sim 0.55\text{Mo}, \leq 0.020\text{Alt}$) is 60% hot metal + quality scrap- 100 t UHP EAF-LF -VD- $\Phi 500$ mm bloom casting-rolling. With Al-Si pre-deoxidation in EAF tapping, Si-Ca deoxidation in LF refining, and using optimized refining slag ($\%: 55 \sim 60\text{CaO}, 30 \sim 35\text{Al}_2\text{O}_3, 5 \sim 10\text{SiO}_2, (\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.41 \sim 1.74$, the Alt content in refined liquid is 0.011% ~ 0.014%. The analysis results on inclusions in $\Phi 140$ mm and $\Phi 160$ mm hot rolled products show that the ingredient of inclusions in steel is 10% MnS, 75% calcium aluminate, 7.5% SiO_2 , 5% oxide containing Ti, and 2.5% others, and the $\leq 5 \mu\text{m}$ inclusions make up more than 95% of the total amount of inclusions in steel to meet the technical requirement of steel 15CrMoG for boiler pipe.

Material Index Steel 15CrMoG for high pressure boiler pipe, EAF-LF-VD- $\Phi 500$ mm Bloom Casting, Low Aluminium, Si-Ca Deoxidation, Inclusions

15CrMoG 钢制造的无缝钢管被广泛用于液压支柱、高压气瓶、高压锅炉、化肥设备、石油裂化、汽车半轴套、柴油机、液压管件等用管。钢材中夹杂物的控制水平决定了这些高压原件的使用寿命^[1]。

1 生产工艺过程控制

莱钢生产 15CrMoG 钢工艺流程: 40% 优质废钢 + 60% 铁水 \rightarrow 100 t UHP EAF \rightarrow 2 座 120 t LF \rightarrow 1 座双工位 120 t VD \rightarrow R16.5 弧形连铸机 ($\Phi 500$ mm) \rightarrow 入坑缓冷/热送 \rightarrow 加热 \rightarrow 轧制 ($\Phi 140$ mm、 $\Phi 160$ mm) \rightarrow 精整 \rightarrow 检验 \rightarrow 入库。

1.1 冶炼工艺

电弧炉冶炼采取炉内留钢、留渣操作, 留钢量在 (20 ± 2) t, 铁水单罐兑入量在 (75 ± 5) t, 总装入量控制在 (125 ± 5) t。采用 TPC 终点控制技术, 冶炼前期采取流渣操作, 中后期及时的向炉内补加渣料, 并适当的减少氧气流量, 防止钢水过氧化, 保证脱磷 (P) 效果的同时, 达到温度 (T) 和终点碳 (C) 的双倍

中。达到出钢条件后, 随钢流加钢芯铝, 钢包合金化时按照成分下限配入合金调整。

1.2 精炼工艺

电弧炉出钢过程中向钢包加入精炼渣, 钢包达到精炼工位后, 定量加入复合精炼渣对精炼渣成分及碱度进行调整。前期采用少量铝粒和 SiC 配合进行扩撒脱氧, 同时采用大流量吹氩, 促进钢渣反应; 中期向钢包内喂入铝线进行沉淀脱氧。为了保证钢水中的氮含量, 精炼采用高电压快速提温, 钢水的真空处理参数为: 氩气流量 $100 \times 2 \text{ L/min}$ (2 个底吹气孔), 真空度 $\leq 67 \text{ Pa}$, 处理时间 $\geq 15 \text{ min}$, 破空后软吹时间 $\geq 15 \text{ min}$ 。精炼工艺后, 试验 4 炉钢水成分如表 1。

1.3 连铸

连铸过程采用保护浇注。15CrMoG 钢液相线温度为 $1515 \text{ }^\circ\text{C}$, 中间包过热度控制在 $(25 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$; 中间包采用中间包专用覆盖剂, 结晶器采用低碳钢保护渣; 结晶器电磁搅拌为 $260 \text{ A}, 1.2 \text{ Hz}$, 末端电磁搅

拌为 88A、6.0 Hz。为保证铸坯质量,二冷制度采用弱冷;拉速控制在 0.35 ~ 0.36 m/min。铸坯入缓冷坑缓冷,时间 ≥ 72 h,出坑时铸坯表面温度 ≤ 200 °C。

1.4 轧制

连铸坯加热时,预热段温度 600 ~ 850 °C,保温时间 ≥ 1.5 h;加热段温度 1 180 ~ 1 250 °C,均热段温度 1 200 ~ 1 240 °C,允许温差 ≤ 30 °C。共轧 $\Phi 140$ mm、 $\Phi 160$ mm 均采用 $\Phi 500$ mm 连铸圆坯。

保证终轧温度 850 ~ 950 °C;轧制过程要严格控制钢材外形尺寸、弯曲度。热轧圆钢的尺寸、外形、重量及允许偏差符合 GB/T702-2008 中 I 组精度规定。

1.5 缓冷

圆钢锯切后应及时入坑缓冷,入缓冷坑温度 > 550 °C,缓冷时间 > 48 h,且出缓冷坑温度 ≤ 200 °C。

2 主要夹杂物控制工艺

(1) 莱钢通过电弧炉精准的终点 TPC 控制技术,使一次终点命中率提高到 95% 以上,最终电弧炉出钢溶解氧含量控制在 400×10^{-6} 以内,减轻精炼脱氧负担。终点 C、P 和出钢温度控制见表 2。

(2) 在稳定电弧炉终点碳的情况下,将精炼加铝脱氧工艺前移^[2],根据终点碳含量,在电弧炉出钢过程中一次性将 Al 加足,在精炼前期对 Al 进行微调,精炼后期及 VD 后禁止调整 Al 含量。在精炼及 VD 过程稳定情况下,准确把握过程 Al 降损失量,在精炼前期控制到要求范围内(表 3)。

(3) 优化精炼渣系组成,55% ~ 60% CaO,30% ~ 35% Al_2O_3 ,5% ~ 10% SiO_2 , $(CaO)/(Al_2O_3) = 1.41 \sim 1.74$ 。

(4) 精炼智能吹氩系统,通过采用不同吹氩模式精确控制不同阶段吹氩流量来保证最佳吹氩效果,具体分阶段吹氩模式见表 4。

(5) 铝脱氧后的钢水需用钙进行夹杂物变性处理^[3]。采用钙处理(喂入实心纯钙线)可生成 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 、 $CaO \cdot Al_2O_3$ 等低熔点夹杂物,但同时会生成许多高熔点夹杂物($CaO \cdot 6Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$)和少量大尺寸的 $CaO-Al_2O_3$ 系夹杂物。采用高 Al_2O_3 含量、高碱度的精炼渣来控制钢液成分^[4],可促使夹杂物低熔点转变和吸附。莱钢电弧炉钢中全 [O] 基本控制在 15×10^{-6} 左右,考虑到钢水中游离氧的存在,要求钢中的 [Ca] 大于

表 1 15CrMoG 钢冶炼钢水成分/%

Table 1 Chemical composition of liquid of steel 15CrMoG /%

炉号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Alt	O
4077	0.16	0.26	0.60	0.009	0.002	1.00	0.50	0.03	0.043	0.012	0.001 4
4078	0.15	0.25	0.60	0.008	0.001	1.01	0.50	0.03	0.034	0.014	0.001 7
4079	0.16	0.27	0.60	0.008	0.003	1.02	0.50	0.02	0.029	0.011	0.001 5
4080	0.15	0.25	0.61	0.009	0.002	1.01	0.50	0.05	0.031	0.011	0.001 4
标准要求	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.35	0.40 ~ 0.70	≤ 0.015	≤ 0.015	0.80 ~ 1.10	0.40 ~ 0.55	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.020	-

表 2 15CrMoG 钢电弧炉终点目标

Table 2 EAF end aim of steel 15CrMoG

C/%	P/%	T/°C
≥ 0.07	≤ 0.008	$1 630 \pm 10$

表 3 LF-VD 精炼过程 Al 损失

Table 3 Al loss in LF-VD refining process

钢种	Al 损失 /%
低碳钢	0.015 ~ 0.020
中高碳钢	0.010 ~ 0.015

表 4 LF 精炼智能吹氩模型

Table 4 Intelligent argon blowing model for LF refining

精炼阶段	流量范围/ (L · min ⁻¹)	情况描述
钢包到位	800	钢包到 LF 工位,氩气打至旁通吹开渣面,测试透气砖透气情况。
供电加热、调渣	20 ~ 60	确保渣面波动小、钢水基本不裸露,电弧波动小,较好的稳弧效果。
增碳	800	主要为满足中高碳钢增碳需要。
喂线	20 ~ 50	渣面波动小、钢水不裸露,喂完线或加完合金后增大搅拌强度均匀成分或强化脱氧。

15×10^{-6} 。

(6) 连铸采用全过程保护浇注,钢包长水口采用密封垫 + 吹氩保护,中间包采用整体水口浇注,确保浇注过程减少钢水二次氧化。

3 研究方法及数据分析

3.1 研究方法

选择连续生产的 4 炉钢,从钢材上分别取样,并加工成检验试样^[5]。使用金相显微镜分别对每个试样拍摄 50 张 500 倍下连续视场金相图片,并使用 image pro plus6.0 软件对夹杂物的尺寸和数目进行统计,结果见表 5,图 1。

3.2 扫描电镜检测结果分析

从扫描电镜结果可以看出,各炉次的夹杂物从形态到种类没有明显差别,夹杂物的成分相对一致。

表 6 为 4 炉次钢夹杂物总体情况分析^[6]。可以看出,钢中夹杂物尺寸较小,绝大多数尺寸小于 $5 \mu\text{m}$,且形状较为规则,含钙夹杂物几乎都为规则

表 5 15CrMoG 钢 Φ140 mm 和 Φ160 mm 轧材夹杂物尺寸分布
Table 5 Distribution of size inclusions in Φ140 mm and Φ160 mm rolled products of steel 15CrMoG

炉号	尺寸分布比例/%						平均直径/ μm	单位面积 夹杂物数量/ (个·mm ⁻²)	面积百分 比/%
	0.5~1.0 μm	1.0~1.5 μm	1.5~2.0 μm	2.0~3.0 μm	3.0~5.0 μm	>5.0 μm			
4077	35.16	39.01	12.17	7.45	3.73	2.48	1.48	274	0.072 7
4078	18.35	22.75	12.08	13.58	17.79	15.45	2.92	363	0.452 7
4079	26.53	38.14	15.22	10.71	6.41	3.00	1.68	340	0.121 7
4080	30.50	38.53	14.07	9.57	3.66	3.66	1.67	288	0.131 1

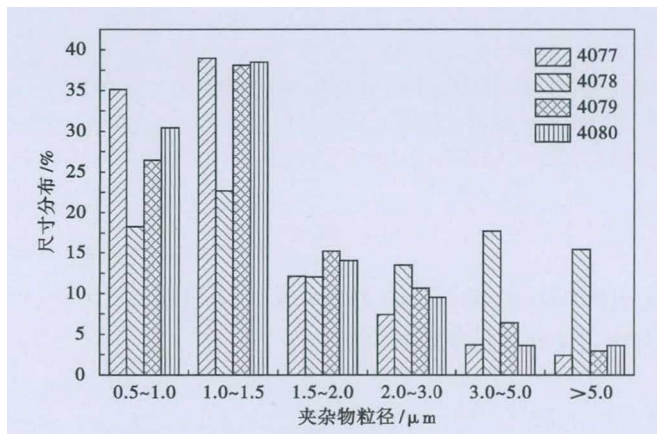


图 1 4 炉次 15CrMoG 钢 Φ140 mm 和 Φ160 mm 轧材夹杂物尺寸分布柱状图

Fig.1 Columnar diagram of distribution of sizes of inclusions in Φ140 mm and Φ160 mm rolled products of 4 heats steel 15CrMoG

表 6 15CrMoG 钢 Φ140 mm 和 Φ160 mm 轧材夹杂物尺寸、形貌和成分一览表

Table 6 General surveys of size, morphology and ingredient of inclusions in Φ140 mm and Φ160 mm rolled products of steel 15CrMoG

尺寸	形貌	成分
绝大部分夹杂物尺寸 < 5 μm, 也有极个别夹杂物尺寸 > 10 μm, 尺寸 < 3 μm 的夹杂物约占 50%。	大部分夹杂物的形貌为规则的圆球形。也有一部分夹杂物的形貌不规则, 呈块状或长条状, 多为 SiO ₂ 或 Al ₂ O ₃ · SiO ₂ 等, 而钙酸盐夹杂物多为规则球形。	多为硅酸钙和铝酸钙, 有极少的 SiO ₂ 、MgO 及含 Ti 氧化物出现, MnS 的含量亦较少, 故复合夹杂物也较少。

表 7 15CrMoG 钢 Φ140 mm 和 Φ160 mm 轧材的夹杂物组成
Table 7 Ingredient of inclusions in Φ140 mm and Φ160 mm rolled products of steel 15CrMoG

项目	1 mm ² 内数目/个	比例/%
铝酸钙	30	75.0
SiO ₂	3	7.5
含 Ti 氧化物	2	5.0
MnS	4	10.0
其它	1	2.5

圆球形, 极少数其它成分夹杂物如 SiO₂ 或 Al₂O₃ · SiO₂ 呈块状或长条状。

表 7 为钢中 1 mm² 范围内夹杂物成分统计情况。其中, 铝酸钙夹杂物占了大多数 (75%), 其成分主要为 Al₂O₃ · MgO · SiO₂ · Ca(O, S) 或 Al₂O₃ · MgO · Ca(O, S)。含有 MnS 的夹杂物占了 10%, 同时也存在少部分 SiO₂ 及含钛氧化物。

4 结论

(1) 莱钢生产的锅炉管 15CrMoG 夹杂物控制水平满足技术要求。

(2) 4077 炉次的小尺寸夹杂物比例最高, 夹杂物平均直径最小, 且单位面积的夹杂物个数的最少, 4079 和 4080 炉次的夹杂物尺寸情况相差不大。

(3) 4078 炉次则表现出较大的异常, 大尺寸夹杂物的占比较高, 且夹杂物的个数也较多。主要异常来源于精炼钢包底吹透气砖单孔堵塞, 真空底吹氩气流量减半, 只有 100 L/min, 大尺寸夹杂上浮缺少动力学条件。

参考文献

[1] 寄海明. 电站锅炉管用钢 15CrMoG 的生产实践[J]. 特殊钢, 2012, 33(5): 32-34.
 [2] 唐海燕, 李京社, 何建勋, 等. EAF-LF/VD-CC 流程生产高压锅炉钢的工艺[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(增刊1): 90-92.
 [3] 阳 燕, 刘建华, 包燕平. 高压锅炉管用钢 P12 的洁净度分析[J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(4): 62-66.
 [4] 蒋育翔, 焦兴利. X80 管线钢夹杂物控制工艺的研究[J]. 特殊钢, 2011, 32(1): 36-39.
 [5] 刘建华, 包燕平, 王国宣, 等. 高压锅炉管钢 P12 铸锭中夹杂物分布解剖研究[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(7): 769-774.
 [6] 唐海燕, 李京社, 刘 亮, 等. 高压锅炉钢非金属夹杂物研究[J]. 炼钢, 2008, 24(4): 26-9.

吴明洋(1985-), 男, 工程师, 2008 年安徽工业大学(本科)毕业, 冶金工艺及质量管理。E-mail: 114381768@qq.com

收稿日期: 2017-08-07