

100 t EAF-LF-VD-CC 流程生产 SK5 弹簧钢的工艺实践

吴辉强¹ 顾超² 林路² 包燕平²

(1 杭州钢铁集团公司技术质量处, 杭州 310022; 2 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 SK5 弹簧钢($\% : 0.75 \sim 0.84\text{C}, \leq 0.35\text{Si}, \leq 0.40\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.030\text{S}$)经 100 t EAF-LF-VD-CC 流程生产。通过 EAF 出钢加硅锰合金和铝铁进行预脱氧, LF 精炼过程添加 80 ~ 150 kg 铝镁钙和少量硅锰合金进行复合铝脱氧, 精炼渣碱度 11.13, $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4.98$ 等工艺措施, 脱氧效果较明显, 铸坯中平均全氧含量达到 11×10^{-6} , 铸坯中氮含量达到 35×10^{-6} 。冶炼过程夹杂物种类按纯 Al_2O_3 -硫化物 $\rightarrow \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \rightarrow \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 变化, 铸坯中夹杂物主要为 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$ 系, 其塑性化程度可通过调整精炼渣成分、降低精炼渣熔点实现进一步优化。

关键词 SK5 弹簧钢 100 t EAF-LF-VD-CC 流程 洁净度

Practice of Process for Spring Steel SK5 Produced by 100 t EAF-LF-VD-CC Flowsheet

Wu Huiqiang¹, Gu Chao², Lin Lu² and Bao Yanping²

(1 Department of Technology and Quality, Hangzhou Iron and Steel Group Co, Hangzhou 310022; 2 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The spring steel SK5 ($\% : 0.75 \sim 0.84\text{C}, \leq 0.35\text{Si}, \leq 0.40\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.030\text{S}$) is produced by 100 t EAF-LF-VD-CC flow sheet. With using the process measures including pre-deoxidizing at EAF tapping by adding silicon-manganese and ferroaluminium, compound-deoxidizing during LF refining process by adding 80 ~ 150 kg aluminium-manganese-calcium alloy and small amount silicon manganese alloy with refining slag basicity 11.13 and $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4.98$, the deoxidizing effect is obvious, the average total oxygen content is 11×10^{-6} in casting billet and the nitrogen content in billet is 35×10^{-6} . During steelmaking process the change sequence of inclusions in steel is pure Al_2O_3 - sulfide- $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ - $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, and the main inclusions in billet is $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$ series, its plasticization level could be optimized future by adjusting refining ingredient and reducing melting point of refining slag.

Material Index Spring Steel SK5, 100 t EAF-LF-VD-CC Flowsheet, Cleanliness

弹簧钢是一种重要的机械设备基础零件制造材料,被广泛应用于汽车制造等行业^[1]。随着我国国民经济的飞速发展,对弹簧钢的质量要求也随之增高,弹簧市场向价格竞争转向技术质量竞争,提高弹簧钢洁净度成为钢铁企业关注的焦点^[2-3]。SK5 是一种高碳弹簧钢,根据国标 GB/T1298-2008,其主要成分要求如表 1 所示。

该钢种碳含量较高,碳的波动会严重影响到钢性能,为保证其产品质量,应尽可能提高钢的洁净度,降低钢中全氧含量。本文主要对杭州钢铁集团(以下简称杭钢)生产 SK5 弹簧钢的流程及钢洁净度进行分析,并提出可行的优化方案。

1 SK5 弹簧钢生产工艺

1.1 冶炼工艺

杭钢目前使用“100 t EAF-LF-VD-CC”的冶炼流程生产 SK5。EAF 终点 $[\text{C}]$ 不低于 0.12%, 出钢温度 1 620 ~ 1 640 °C, 炉后加入硅锰合金 100 kg、铝铁

表 1 SK5 弹簧钢主要成分要求 /%

Table 1 Requirement of chemical composition of spring steel SK5 /%

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.75 ~ 0.84	≤ 0.35	≤ 0.40	≤ 0.035	≤ 0.030	0.20

200 kg、锰碳球 100 kg 与石灰 200 kg 进行预脱氧与造渣,出钢后保证钢包渣面厚度在 50 mm 以内。

在到达 LF 工位后 2 ~ 4 min 加入硅铁 150 ~ 200 kg、铬铁 100 kg 左右、铝镁钙 80 ~ 150 kg 以及少量硅锰合金进行复合铝脱氧,加入石灰 500 ~ 600 kg 进行造渣,并在渣面加入碳化硅 40 kg 以及少量电石和铝灰进行扩散脱氧,加入萤石 200 ~ 400 kg 调节渣的粘度和流动性;在反应 20 ~ 35 min 后经过取样分析进行第二次加料,选择性加入锰铁、硅铁、铬铁等继续进行脱氧和合金化,并补加 50 ~ 150 kg 石灰造渣、50 ~ 100 kg 萤石化渣,同时加入碳粉进行增碳;在 LF 精炼结束后钢包吊运出站之前,补加合金

表2 SK5 弹簧钢 LF 精炼渣主要成分和碱度

Table 2 Main ingredient of LF refining slag for spring steel SK5

渣成分/%							碱度 (R)	CaO/ Al ₂ O ₃
CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	CaF ₂		
63.83	12.83	5.54	3.89	2.33	0.11	11.13	11.52	4.98

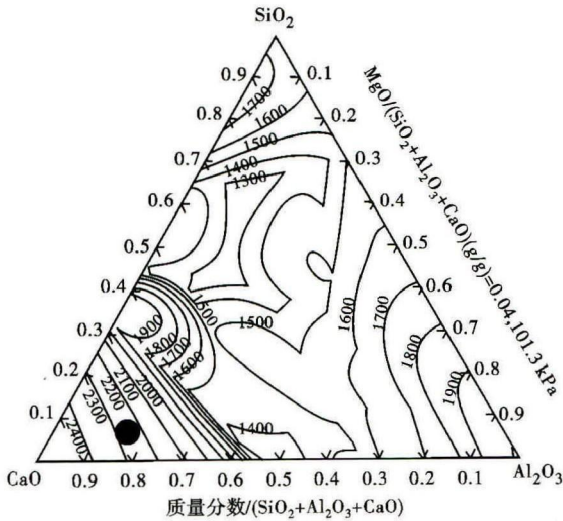


图1 SK5 弹簧钢冶炼 LF 精炼渣主要成分

Fig. 1 Main ingredient of LF refining slag for spring steel SK5

将钢液合金化至目标成分。

1.2 LF 精炼渣的组成

弹簧钢 SK5 所使用的 LF 主要精炼渣成分如表 2 所示,其碱度为 11.52, CaO/Al₂O₃ 为 4.98, MgO 含量为 3.98%, 将该精炼渣成分标记在 CaO-SiO₂-Al₂O₃-4% MgO 的相图上,如图 1 所示。

由图 1 和表 2 可知,所用精炼渣成分在 CaO-SiO₂-Al₂O₃-4% MgO 的相图上处于 2 200 °C 与 2 300 °C 液相线之间,熔点较高。精炼渣成分对钢水洁净度有较重要的影响^[4-7]。高精炼渣熔点易导致钢中生成高熔点夹杂物,在轧制过程中不变形,引起应力集中,在周期性载荷下形成裂纹源,严重影响弹簧钢寿命。且为了改善精炼渣的流动性,降低化渣难度,杭钢在冶炼过程中加入萤石,精炼渣中 CaF₂ 含量达到 11.13%,渣中的氟元素不仅会对环境造成污染,还会对钢包包衬造成腐蚀,提高生产成本。

2 SK5 弹簧钢洁净度分析

2.1 钢中全氧含量

对冶炼过程中 3 炉 SK5 弹簧钢进行全流程取样,使用红外分析法测定钢样中全氧含量,平

均值变化情况如图 2(a) 所示。在 LF 精炼前,钢中全氧含量为 50×10^{-6} ; LF 精炼过程脱氧效果较明显,钢中全氧含量在 VD 精炼前降至 13×10^{-6} ,脱氧率达 74%;在 VD 精炼直到铸坯的过程中,钢中全氧含量无回升现象,最终铸坯中全氧含量为 11×10^{-6} 。

2.2 钢中氮含量

对冶炼过程中 3 炉 SK5 弹簧钢进行全流程取样,所检测氮含量平均值如图 2(b) 所示。从 EAF 出钢后到 VD 精炼前,钢中氮含量一直处于上升状态,在 VD 精炼前,钢中氮含量上升至 43×10^{-6} 。经过 VD 真空精炼,钢中氮含量下降了 19×10^{-6} ,达到 24×10^{-6} ,而在连铸过程中又发生吸氮现象,最终铸坯中氮含量为 35×10^{-6} 。整个流程氮含量控制较理想,VD 真空精炼脱氮效果好,铸坯中氮含量处于较低水平。

2.3 钢中显微夹杂物

2.3.1 EAF 出钢后

在 EAF 出钢后所观察到的显微夹杂物中纯 Al₂O₃ 占 43%,其中极少部分外层有硫化物包裹,尺寸在 2 ~ 6 μm,多有不规则形状,有聚集现象。此外,EAF 出钢后所观察到的 CaS-MnS-FeS 类硫化物夹杂占比例也较大,该类夹杂物尺寸普遍大于 Al₂O₃ 类夹杂,部分尺寸在 10 μm 以上,呈长条状,扫描电镜下观察到的颜色较浅,明显区别于纯 Al₂O₃ 类夹杂。另有少量 MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaO 类夹杂,尺寸在 50 μm 以上,呈圆球形。

2.3.2 LF 精炼

LF 精炼前期所观察到的主要夹杂物为 MgO-Al₂O₃-CaO 类夹杂,该类夹杂物主要来自于加入的铝镁钙等与脱氧产物 Al₂O₃ 发生的反应,形状趋近于圆球形,但仍有少量棱角,所观察到最大尺寸为 3.7 μm。另有少量 MnS-MnO、MnS-MnO-CaO、MnS-MnO-CaO-SiO₂、MgO-Al₂O₃-CaO-SiO₂ 类夹杂,其尺

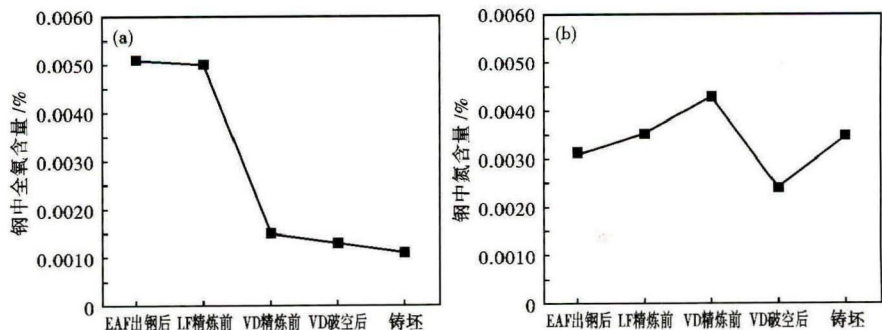


图2 SK5 弹簧钢全流程全氧含量(a)和氮含量(b)变化

Fig. 2 Change of total oxygen content (a) and nitrogen content (b) in spring steel SK5 during flowsheet

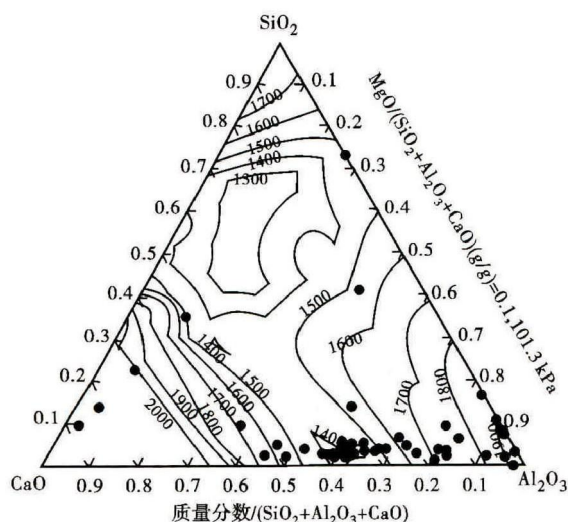


图 3 SK5 弹簧钢铸坯夹杂物成分

Fig. 3 Ingredient of inclusions in casting billet of spring steel SK5

寸多在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

2.3.3 VD 精炼

VD 精炼前期所观察到的夹杂物基本全部为 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 类夹杂物, 该类夹杂物中 SiO_2 含量较少, 在 5% 左右, 多数呈圆球形, 部分尺寸在 $5 \sim 8 \mu\text{m}$, 另有极少量 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaS-CaO}$ 类夹杂物。

2.3.4 铸坯

铸坯中观察到的夹杂物情况与 VD 精炼前期种类相似, 但其中 MgO 含量有所增加, 且尺寸普遍增大, $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 粒级夹杂物比例明显上升, 并观察到有尺寸在 $20 \mu\text{m}$ 以上的夹杂物。由于所观察到的夹杂物中 MgO 含量大多在 10% 左右, 因此将所观察到的夹杂物主要成分示意于 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-10% MgO}$ 相图上, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, SK5 弹簧钢中夹杂物有很大一部分没有进入 1600°C 液相线以内, 熔点较高, 塑性需进一步进行优化。

3 结论

(1) 杭钢使用“100 t EAF-LF-VD-CC”的冶炼流程生产弹簧钢 SK5, 精炼过程脱氧效果较明显, 脱氧率达 74%, VD 与连铸过程中钢中全氧含量无增加趋势, 铸坯中平均全氧含量为 11×10^{-6} , 可进一步

降低。

(2) 弹簧钢 SK5 整个冶炼流程氮含量控制较理想, LF 精炼过程中氮含量有一定增加, 但 VD 真空精炼脱氮效果好, 铸坯中氮含量处于较低水平。

(3) 杭钢冶炼弹簧钢 SK5 所用 LF 精炼渣在 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-4% MgO}$ 系中熔点在 $2200 \sim 2300^\circ\text{C}$, 且含有 11.13% 的 CaF_2 , 需进一步降低渣熔点与渣中 CaF_2 含量, 通过渣-钢平衡与钢水-夹杂物平衡控制钢中夹杂物塑性, 同时减少 CaF_2 对钢包包衬的腐蚀。

(4) 弹簧钢 SK5 冶炼中夹杂物主要类型变化为: 纯 Al_2O_3 、硫化物 (EAF 出钢后) $\rightarrow \text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (LF 精炼中期) $\rightarrow \text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ (VD 精炼中期、铸坯), 其尺寸在 LF 精炼过程中逐渐降低, LF 精炼中期观察到的夹杂物最大尺寸为 $3.7 \mu\text{m}$; 在 VD 精炼与连铸过程中尺寸又发生增大, 铸坯中 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 粒级夹杂物比例明显回升, 且夹杂物熔点较高, 塑性需进一步优化。

参考文献

- [1] 王 郢, 李 宏, 郭 佳, 等. 超低氧弹簧钢 60Si2MnA 精炼过程夹杂物的研究[J]. 钢铁, 2008, 43(10): 29-33.
- [2] 仇东丽, 罗德信, 蒋跃东, 等. 气门弹簧及悬架弹簧用线材现状与发展方向[J]. 武钢技术, 2012, 50(5): 52-54.
- [3] Park Joo Hyun, Todoroki Hidekazu. Control of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Spinel Inclusions in Stainless Steels[J]. ISIJ International, 2010, 50(10): 1333-1346.
- [4] 吴 超, 孙宜强, 罗德信, 等. 不同碱度精炼渣系对弹簧钢夹杂物的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(4): 254-257.
- [5] 王向红, 周 俐, 刘天泉, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 精炼渣系对 55SiCrA 弹簧钢夹杂物形态控制的影响[J]. 特殊钢, 2013, 34(3): 14-17.
- [6] Chen Shu-hao, Jiang Min, He Xiao-fei, et al. Top Slag Refining for Inclusion Composition Transform Control in Tire Cord Steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(6): 490-498.
- [7] 黄 聪. 高碳钢精炼造渣工艺优化实践[J]. 甘肃冶金, 2015, 37(1): 43-44.

吴辉强(1982-), 男, 工程师, 2006 年东北大学(本科)毕业, 洁净钢冶炼工艺研究。

收稿日期: 2015-08-13