

EAF-LF (VD)-HCC 流程生产钻杆管用钢 26CrMoNbTiB 的洁净度

刘剑辉¹ 朱荣¹ 易操¹ 肖鸿光² 彭自胜² 钟春生² 孙群保²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 湖南衡阳钢管(集团)有限公司,衡阳 421001)

摘要 26CrMoNbTiB 钢由 45 t EAF-LF(VD)-Φ80 ~ 180 mm 管坯 HCC 流程冶炼。该钢各工序的洁净度试验结果表明,LF-VD 后钢中氧含量为 $(8 \sim 18) \times 10^{-6}$, 平均夹杂物数量最低为 2.31 个/mm², 连铸坯平均夹杂物数量为 3.66 个/mm², $\geq 50 \mu\text{m}$ 大型夹杂物平均含量为 4.08 mg/10 kg。加强钢包到中间包长水口的密封保护和采用钢包下渣检测装置,提高中间包容量和采用挡渣墙是进一步提高铸坯洁净度的关键工艺措施。

关键词 钻杆管用钢 26CrMoNbTiB EAF-LF (VD)-HCC 洁净度

Cleanliness of Steel 26CrMoNbTiB for Drill Pipe Produced by EAF-LF (VD)-HCC Flow Sheet

Liu Jianhui¹, Zhu Rong¹, Yi Cao¹, Xiao Hongguang², Peng Zisheng², Zhong Cunsheng² and Sun Qunbao²

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Hunan Hengyang Steel Tube (Group) Co Ltd, Hengyang 421001)

Abstract Steel 26CrMoNbTiB is melted by 45 t EAF-LF (VD)-Φ80 ~ 180 mm tube billet HCC flow sheet. Test results of cleanliness of the steel at each melting process showed that the oxygen content in steel after LF-VD is $(8 \sim 18) \times 10^{-6}$ with lowest average inclusion amount i. e. 2.31 inclusions/mm² and that is 3.66 inclusions/mm² in casting billet and the average content of $\geq 50 \mu\text{m}$ micro inclusions in billet is 4.08 mg/10 kg. To tighten the sealed shield of long nozzle from ladle to tundish, use monitoring instrument for ladle slagging out, increase tundish capacity and use dam in tundish are the key process measures to further improve cleanliness of billet.

Material Index Steel 26CrMoNbTiB for Drill Pipe, EAF-LF (VD)-HCC, Cleanliness

衡钢钻杆管用钢 26CrMoNbTiB 存在主要问题是精炼渣碱度低,脱硫效果差;夹杂物含量高,铸坯显微夹杂平均为 16.05 个/mm²,尺寸 $\geq 10 \mu\text{m}$ 夹杂物为 19.64%,大型夹杂平均为 21.46 mg/10 kg。

本实验在精炼及连铸生产工序对钢中的气体、炉渣、夹杂物进行了取样分析,研究了 45 t EAF-LF(VD)-Φ80 ~ 180 mm HCC 工艺优化条件下生产钻杆管钢的夹杂物变化。钻杆管用钢化学成分如表 1 所示。

表 1 26CrMoNbTiB 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 26CrMoNbTiB / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	As	Sn
0.24 ~ 0.29	0.15 ~ 0.35	0.40 ~ 0.65	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.20	≤ 0.20	0.95 ~ 1.15	0.38 ~ 0.52	0.020 ~ 0.050	0.010 ~ 0.040	0.000 5 ~ 0.002 0	≤ 0.02	≤ 0.02

1 研究方法

1.1 工艺流程和参数优化

衡钢电炉钢厂以废钢为主要生产原料。废钢在出钢量 45 t 的偏心底出钢(EBT)电弧炉中熔化。当碳、磷及炉内温度达到目标值后,出钢时在钢包中进行预脱氧处理和扒渣处理;到 LF 工位后,向钢包中加入合成精炼渣。二次精炼主要包括三个步骤:(1)合金化、脱氧和合成精炼渣的熔化期间采用搅

拌;(2)采用氩气搅拌,提高真空条件下的脱气,主要是氢和氮的精炼操作;(3)真空后再一次使用气体搅拌进一步促使夹杂物从钢液中分离到渣中,在此期间,同时采用电极加热提高浇铸温度以促进夹杂物的吸收。钢包精炼处理后,钢液在氩气密封下到水平连铸机生产圆坯。

针对冶炼钻杆管用钢 26CrMoNbTiB 存在的问题,一方面对精炼渣进行了实验室研究,提高炉渣碱

度,确定了炉渣组元质量百分数(%): $55 \sim 60\text{CaO}$ 、 $\leq 10\text{SiO}_2$ 、 $20 \sim 30\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $4 \sim 10\text{MgO}$ 、 $\leq 5\text{CaF}_2$ 、 $\leq 1(\text{MnO} + \text{FeO})$ 、 0.8Λ 。另一方面对吹氩系统进行了改造,将弥散型透气塞改为峡缝式透气塞,并对吹氩参数进行优化,吹氩搅拌功率参数如表2所示。

表2 氩气搅拌功率
Table 2 Parameters of argon stirring

工艺过程	搅拌功率/($\text{W} \cdot \text{t}^{-1}$)
电弧炉出钢	200 ~ 300
加热升温	100
加合金后,测温取样前的混匀	150 ~ 200
脱硫及钢渣反应	150
脱氧及去夹杂弱搅拌	30 ~ 50

1.2 取样与分析

过程取样包括5个不同的阶段:LF处理前期、LF处理终点、VD处理终点、15 t中间包、连铸坯。包括渣样、小钢样、大钢样、气体样,共对5炉钢进行取样分析。试样分析采用以下方法:(1)气体含量采用熔融萃取技术测定;(2)渣样采用荧光法分析;(3)夹杂物分析方法。

小钢样制成金相试样,采用金相显微镜、扫描电镜和EDAX能谱仪对钢中显微夹杂物的数量、组成及来源进行研究。大钢样采用大样电解法分离出钢中的大型夹杂物,然后应用扫描电镜和电子探针对于大型夹杂物的形貌和组成进行研究^[1,2]。

2 结果讨论

2.1 气体含量

电弧炉出钢时,向钢液中加入预脱氧剂 $1 \sim 2 \text{ kg/t}$ 、预熔精炼渣 $3 \sim 5 \text{ kg/t}$ 、精炼剂 $2 \sim 4 \text{ kg/t}$ 和所需合金,严格控制下渣量。精炼过程中加入碳化硅 $1 \sim 3 \text{ kg/t}$ 或碳粉 $0.5 \sim 2 \text{ kg/t}$ 、硅铁粉 $0.5 \sim 2 \text{ kg/t}$,根据炉渣情况补加渣料,保持炉渣碱度和流动性,强化脱氧脱硫。由图1(a)可知,从LF冶炼前期到VD冶炼终点,钢液中氧含量急剧降低。钢中全氧含量,在LF+VD工艺条件下,冶炼终点时钢中氧含量最高值为 18×10^{-6} ,最低值为 8×10^{-6} 。说明因供氧强度的提高,电弧炉的终点控制不是很理想。

从图1(b)中可知,VD后所有炉次氮含量都比LF有所降低,这表明,真空对脱氮的作用还是比较显著的,脱氮率 $20\% \sim 37\%$ 。但是VD冶炼结束到连铸坯氮含量又有 $1\% \sim 5\%$ 的增加,氮的增加主要与保护浇铸效果有关。

2.2 显微夹杂物

2.2.1 显微夹杂物数量变化

根据文献[2]统计冶炼过程各阶段夹杂物的数量。5炉钢不同冶炼和浇铸阶段显微夹杂数量变化如图1(c)所示。LF到VD钢中显微夹杂物平均数量从 8.435 个/mm^2 显著减少到 2.314 个/mm^2 ,去除率达到 72.3% ,可见LF、VD去除夹杂物的效果很明显。但从VD到中间包和连铸坯显微夹杂又分别

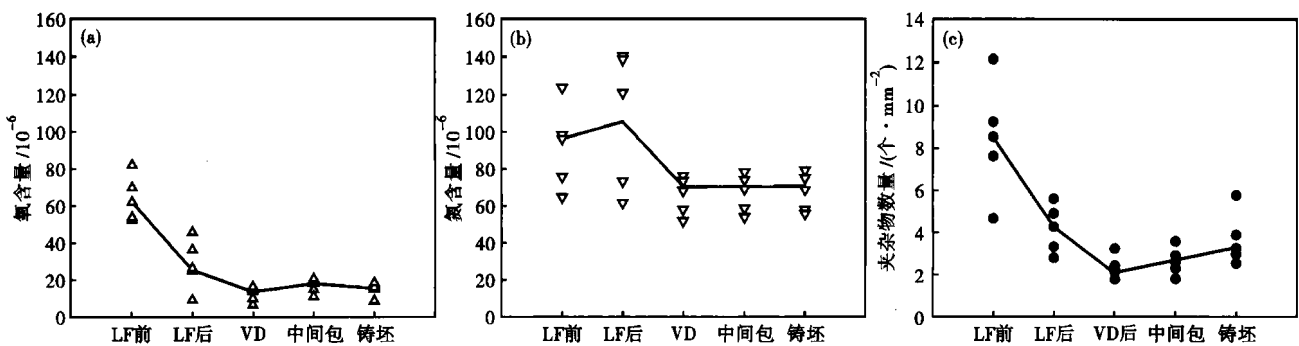


图1 各冶炼周期钢中氧含量(a)、氮含量(b)和显微夹杂物数量(c)

Fig. 1 Oxygen content (a), nitrogen content (b) and micro-inclusions number (c) in steel in each steelmaking period

增加了 0.31 个/mm^2 和 1.35 个/mm^2 。说明浇铸时中间包有二次氧化现象发生。

2.2.2 夹杂物的粒径分布

由表3各周期钢中显微夹杂分布可见,夹杂物粒径主要分布在 $0 \sim 15 \mu\text{m}$ 内,其中又以 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的夹杂物为主。在LF+VD生产工艺条件下,LF前期 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的夹杂物所占比例为 75.8% ;LF处理后

期 $\leq 10 \mu\text{m}$ 夹杂物为 72.6% ;VD处理后 $\leq 10 \mu\text{m}$ 夹杂物为 67.70% ;中间包 $\leq 10 \mu\text{m}$ 夹杂物为 82.6% ;连铸坯 $\leq 10 \mu\text{m}$ 为 98.7% ;在VD处理后 $> 10 \mu\text{m}$ 的夹杂物所占比例有所升高,主要原因一方面是真空中钢渣的剧烈反应;另一方面,细小的夹杂物聚集长大速度慢。炉渣情况见表4。

2.2.3 显微夹杂物的形貌和组成

表 3 各周期钢中显微夹杂的分布/%

Table 3 Distribution of micro-inclusions in steel in each steelmaking period / %

工序	粒径大小/ μm				
	0~5	5~10	10~15	15~20	>20
LF 前期	35.5	40.3	17.8	3.6	2.8
LF 后期	17.8	54.8	17.0	7.1	3.3
VD 处理后	28.9	38.8	17.9	7.7	7.1
中间包	38.2	44.4	11.2	2.18	2.10
连铸坯	56.3	42.4	0.85	0.30	0.15

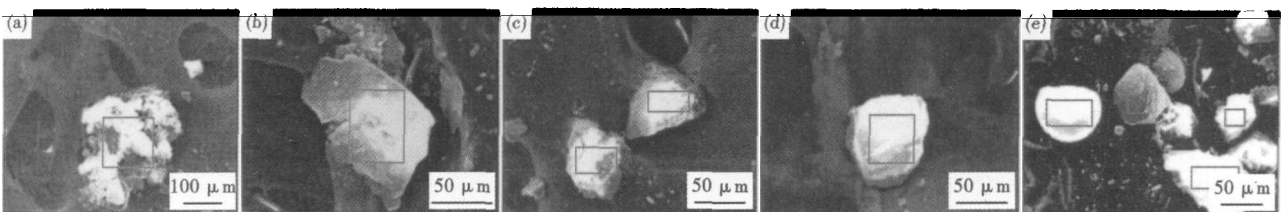
表 4 LF 精炼初渣和终渣的成分/%

Table 4 Ingredient of initial and end LF refining slag / %

精炼渣	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	(MnO+FeO)	Λ
初渣	39~43	10~18	18~26	4~6	<1.0	0.71~0.73
终渣	40~45	8~15	20~29	6~8	<0.5	0.74~0.78

钢中的夹杂物组成包括硅酸盐类夹杂物、硅铝酸盐类夹杂物、铝酸盐类夹杂物、镁铝尖晶石、Al₂O₃ 类夹杂物、硫化物和 TiN。

由扫描电镜观测认定钢中夹杂物组成,在 LF 冶炼初期钢中的夹杂物主要由硅酸盐、硫化物、细小的 Al₂O₃ 以及二氧化硅等组成。硅酸盐及二氧化硅的形成主要是由于加入的硅铁粉脱氧,而精炼初期,钢中的硫含量较高,故形成较多的硫化物夹杂,但尺寸都较小。

图 2 钢中大型夹杂物形貌背散射电子像:(a)硅酸盐;(b)硅铝酸盐;(c)MgO + CaO;(d)SiO₂;(e)Al₂O₃Fig. 2 Morphology of macro-inclusions in steel, electro back scattering diffraction: (a) silicate; (b) silicon aluminates; (c) MgO + CaO; (d) SiO₂; (e) Al₂O₃

大型夹杂物均以含 Al 夹杂为主,其次是含 Si 类夹杂物,同时含 Mg 和 Ca 等。尖晶石类夹杂物的主要来源是钢中的脱氧产物与进入钢中的 MgO 结合而成,其中 MgO 可能来自于渣料,也可能是耐火材料侵蚀脱落而进入钢液。

3 结论

(1) 通过 5 炉试验钢的分析数据可知,衡钢采用 EAF-LF(VD)-HCC 优化工艺后生产的钻杆管用钢 26CrMoNbTiB,铸坯中显微夹杂物数量为 3.664 个/mm²、≤10 μm 夹杂物为 98.7%、大型夹杂物为 4.08 mg/10 kg,达到了较好的洁净度。

(2) 为了避免二次氧化,应加强钢包到中间包

LF 处理结束,钢中的夹杂物主要有硫化物、硅铝酸盐、SiO₂、细小的 Al₂O₃、镁铝尖晶石及铝酸钙等。硅铝酸盐主要是 Si-Al 脱氧产物在上浮过程中聚集而成。LF 精炼时,部分耐火材料脱落进入钢液,在钢中形成镁铝尖晶石夹杂物。

VD 处理后,钢中的夹杂物主要有硅铝酸盐、硫化物、SiO₂、氮化钛、细小的 Al₂O₃、镁铝尖晶石及铝酸钙。

中间包中的夹杂物主要是硅铝酸盐、Al₂O₃、TiN、MnS、硅酸盐、镁铝尖晶石、钙硅铝酸盐。

铸坯中的夹杂物主要是 MnS、TiN、CaS、Al₂O₃、镁铝尖晶石、硅铝酸盐、钙硅铝酸盐。另外,铸坯中也发现了部分含有钾的夹杂物,可能是连铸卷渣造成的。

2.3 大型夹杂物

大型夹杂物是指钢中粒径大于 50 μm 的夹杂物,由于其粒径大,对钢的各项力学性能都会产生较大的不利影响^[3]。5 炉钢的连铸坯中大型夹杂物平均值为 4.08 mg/10 kg。

经分析衡钢精炼和连铸坯钢样中的大型夹杂物主要由硅酸盐类、硅铝酸盐类、(MgO + CaO) 类、SiO₂ 类和 Al₂O₃ 类组成(图 2)。

长水口的密封保护和采用钢包下渣检测装置。提高中间包的容量,采用挡渣墙等避免因卷渣而形成的夹杂物对铸坯洁净度的影响。

参考文献

- 徐南平. 钢铁冶金实验技术及研究方法. 北京:冶金工业出版社, 1995
- 石绍清,尹振江,卢帝维,等. 水平连铸管坯钢中的非金属夹杂物. 北京科技大学学报,2007,29(S1):93
- 董履仁,刘新华. 钢中大型非金属夹杂物. 北京:冶金工业出版社, 1991

刘剑辉(1973-),男,博士研究生,特殊钢的理论和冶炼工艺研究。

收稿日期:2009-08-03