

# 50Cr5MoV 钢中非金属夹杂物行为

吕沙,吴光亮

(中南大学 资源加工与生物工程学院,湖南 长沙 410083)

**摘 要:**对采用“EBT→LF→VD”工艺路线生产 50Cr5MoV 锻钢轧辊炼钢过程全氧和夹杂物进行了分析. 结果表明:LF 精炼后钢液中  $\omega(T[O])$  平均为  $47 \times 10^{-6}$ ,VD 出站为  $14 \times 10^{-6}$ ,中间包为  $15.5 \times 10^{-6}$ ,铸坯为  $18 \times 10^{-6}$ . LF 精炼初期,钢中夹杂物主要是不规则的  $Al_2O_3$  夹杂,96.75% 的夹杂物尺寸小于  $10 \mu m$ . LF 精炼后,大量夹杂物为  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  为主要成分的  $0 \sim 10 \mu m$  复合氧化物夹杂. 钢水向中间包转移过程中保护性浇注不理想,二次氧化严重导致钢水夹杂逐渐增多,主要为球形  $mCaO \cdot nAl_2O_3$  的复合夹杂物. 铸坯中 99.81% 的夹杂物尺寸小于  $10 \mu m$ ,其中大部分为球形钙铝酸盐夹杂,还有少量球状硅铝酸钙复合夹杂. 全过程的工艺优化是控制夹杂物(主要是氧化物)的合理途径,可确保实现 50Cr5MoV 合金铸钢的冶炼.

**关键词:**50Cr5MoV 钢; 夹杂物行为; 全氧含量  
**中图分类号:**TG113.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2015)02-0110-06

## Behavior of non-metallic inclusion in 50Cr5MoV

Lv Sha, Wu Guangliang

(School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The total amount of oxygen content and inclusions in 50Cr5MoV forged steel roll by the route of EBT→LF→VD were analyzed. The results show the average  $\omega(T[O])$  is  $47 \times 10^{-6}$  after LF refining and  $14 \times 10^{-6}$  after VD refining, and  $15.5 \times 10^{-6}$  in tundish and  $18 \times 10^{-6}$  in billet on average. During the initial stage of LF refining, the inclusions in steel mainly are irregular forms of  $Al_2O_3$ , 96.75% of the inclusions have diameters less than  $10 \mu m$ . After the LF refining, most of the inclusions are  $0 \sim 10 \mu m$  diameters of compound oxide inclusions, predominantly containing  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ . During the transfer of steel to tundish, the protective casting is not ideal, and the severe reoxidation contributes to the growing amount of inclusions, mainly containing spherical  $mCaO \cdot nAl_2O_3$  compound oxide inclusions. 99.81 percent of the inclusions in the steel slab are less than  $10 \mu m$ . Most of them are spherical calcium-aluminate compound inclusion, with a few spherical calcium aluminosilicate compound inclusion. Therefore, inclusion control in 50Cr5MoV steel is a systematic engineering and could not be achieved by partial technical improvement.

**Keywords:** 50Cr5MoV steel; inclusion behavior; total oxygen content

锻钢轧辊是主要大型工具,是关系到钢材质量和品种的关键所在,也是轧机上的主要工作部件,我国轧辊制造业经过几代科研人员的不懈努力和几十年的发展和壮大,今天已经成为世界轧辊产量大国,轧辊制造技术和材质品种方面有很大的发展. 同时随着科学技术的飞快发展,锻钢轧辊的工作条件越来越苛刻,促使其必须拥有优良的抗压强度、耐磨性与淬透性. 为了提高轧板质量以及支承辊的寿命,日本、英国

等已在 20 世纪 70 年代就开始采用含 Cr5% 制造的支承辊,而我国在 90 年代中期才开始研制出 Cr4 , Cr5 支承辊材料. 由于铬含量较高,拥有良好的淬透性和耐磨性,其抗疲劳、抗事故性能有了明显提高,弥补了支承辊的不足,从而得到广泛应用. 支承辊材料发展的趋势是通过降低碳含量,增加 Cr 含量,并相应调整其他合金元素,来获得良好的淬硬性,提高其综合使用性能. 但是支承辊的制造随之 Cr 含量的增加而愈趋于困难. 从目前看来,Cr5 系支承辊在一段时间内仍占主导地位. 然而由于夹杂物存在致使 Cr5 系支承辊的性能未显著提高,从而导致轧板的厚度不均匀以及断裂韧性和抗疲劳韧性较差,降低了轧辊质量.

50Cr5MoV 是典型的 Cr5 系钢<sup>[1]</sup>,其特点是碳含量较低,增加 Cr,Mo,V 等合金元素有利于提高钢中碳化物含量,从而显著提高钢的淬透性与抗断裂性能. 50Cr5MoV 大型支承辊是宽带钢热连轧机、薄板埋连铸连轧机、中厚板轧机、宽厚板轧机的重要大型生产工具. 现行生产工艺流程为:废钢 + 铁水→50 tEBT 超高功率炉壁集束氧枪电弧炉初炼→电炉出钢过程合金化 →60 tLF 钢包炉精炼→60 tVD 真空脱气→弱吹氩搅拌→VC 真空浇注. 其中 LF 是钢包精炼炉,其主要作用是温度调节、成分微调和脱硫<sup>[2]</sup>. VD 是真空精炼炉,主要用于脱气,脱硫和脱碳,进一步降低钢中气体含量. VC 是真空浇注,避免浇注过程中发生二次氧化. 炉卷轧机上的关键部件,要求其在服役期有很高的可靠性<sup>[3-4]</sup>. 50Cr5MoV 的一个典型组织铸造缺陷是非金属夹杂. 大型支撑辊中的非金属夹杂物破坏了金属的连续性,对锻钢轧辊的塑性、冲击韧性、疲劳性能和耐腐蚀性能产生严重影响<sup>[5-6]</sup>. 本文结合某钢厂 50Cr5MoV 的生产工艺,对 50Cr5MoV 合金铸钢中夹杂物的数量、尺寸及组成进行系统分析,并对其形成机制和影响因素进行了研究,确定钢中夹杂物的主要来源、组成及种类.

## 1 实验材料与方法

根据生产工艺,本实验针对连续生产的 4 炉 50Cr5MoV 锻钢轧辊进行研究,在各炉的电炉出钢、LF 进站、LF 合金化、LF 出钢、VD 出钢、中间包和铸坯各点进行取样,各工序取样 3 次. 抛光后的金相试样用 DMI5000M 金相显微镜对各种形状和尺寸的夹杂物进行数量统计,对各个试样均随机进行了 100 个视场的观察,在 100 倍视场下观察粒径大于 1 μm 的夹杂物,统计单位面积上的夹杂物数量<sup>[7]</sup>,分析各工序中单位面积夹杂物的数目、面积百分数和粒度分布;利用氧氮氢气体分析仪测定不同冶炼阶段钢液中全氧含量;采用 JEM - 2100F STEM TEM - EDS 进行化学成分分析. 50Cr5MoV 支撑辊用钢,其化学成分见表 1.

表 1 50Cr5MoV 钢的化学成分 %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.45 ~ 0.49	0.42 ~ 0.52	0.58 ~ 0.72	≤0.010	≤0.010	4.80 ~ 5.40	≤0.60	0.40 ~ 0.55	0.10 ~ 0.30

## 2 实验结果与分析

### 2.1 钢中全氧含量分析

钢中全氧含量由自由氧和化合氧组成<sup>[8]</sup>. 其中一般用钢中总氧含量 T[O] 来直观衡量钢水的洁净度水平<sup>[9]</sup>. 总氧含量低表明钢中氧化物夹杂较少,洁净度较高. 本次试验用钢 50Cr5MoV 各工序钢中 T[O] 含量平均值的变化如图 1 所示. 从图 1 可以看出,随着 LF 精炼和 VD 过程的进行,50Cr5MoV 钢水中全氧含量呈逐渐降低的趋势. LF 进站前钢中 T[O] 平均值  $56 \times 10^{-6}$ ,LF 精炼过程吹氩处理和扩散脱氧效果较好,钢中 T[O] 平均值迅速降低至  $47 \times 10^{-6}$ ,降低了 33.96%. VD 真空处理过程中钢中 T[O] 进一步降低,VD 终点时钢水中 T[O] 平均为  $14 \times 10^{-6}$ ,较 LF 后降低了 70.21%,说明 LF,VD 处理对提高钢水洁净度效果显著;中间包 T[O] 为  $15.5 \times 10^{-6}$ ,略有增加,表明从钢包到中间包保护性浇注密封性不好,存在二次氧化现象.

### 2.2 各工序非金属夹杂物分析

钢中夹杂物按尺寸大小可分为显微夹杂物 and 大型夹杂物 2 种,显微夹杂物指尺寸小于 50 μm 可以在金相显微镜下观察到的夹杂物,大型夹杂物指尺寸大于 50 μm<sup>[3,8-10]</sup>.

2.2.1 钢中夹杂物定量分析

对 4 炉钢在 LF 进站、LF 出站、VD 出站、中间包和铸坯取样,利用 DMI5000M 金相显微镜在 100 倍视场下观察粒径大于  $1\mu\text{m}$  的夹杂,对各种尺寸的夹杂物数量进行统计,得到各工序中单位面积夹杂物的数目和面积百分数,来分析钢中夹杂物的生成和变化情况,所得结果如图 2 ~ 图 3 所示.

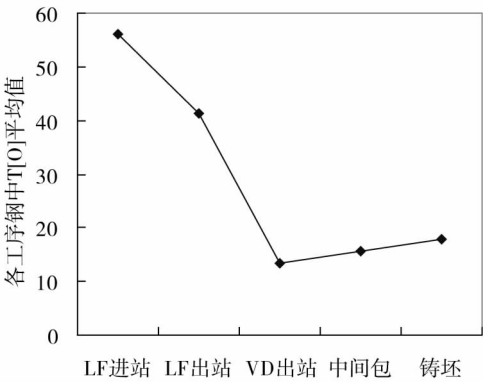


图 1 各工序钢中 T[O] 平均值

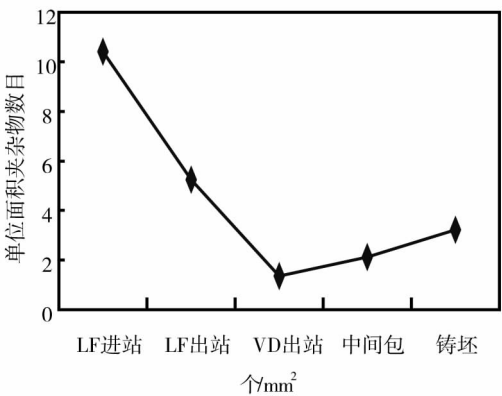


图 2 各工序钢水中单位面积夹杂物数目平均值

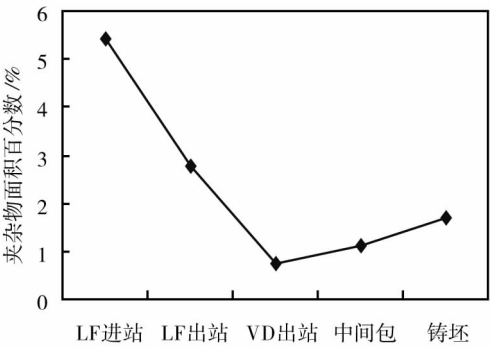


图 3 各工序钢水中夹杂物面积百分数平均值

由图 2 可知,各工艺阶段的单位面积夹杂物数目的变化趋势与 T[O] 的变化趋势基本相同. LF 炉精炼前显微夹杂数量平均值为  $10.4\text{ 个/mm}^2$ ,在 LF 精炼阶段,由于夹杂物的不断聚集与去除,数量减少较快,显微夹杂物降至  $5.24\text{ 个/mm}^2$ ,减少 49%,同时夹杂物尺寸变小. VD 喂线后钢水中夹杂物数量平均值进一步降低,减少到  $1.36\text{ 个/mm}^2$ ,去除率达 37%,可能是由于喂硅钙线使得钢液中的夹杂物变性,一部分经钙处理的夹杂物在吹氩条件下相互碰撞或以其他形式从钢液中上浮,这样经钙处理后钢液中的显微夹杂数量将显著减少,同时尺寸进一步变小. 由于钢液在浇注过程中有二次氧化现象发生,钢水中氧化铝夹杂增多,显微夹杂物数量上升明显,显微夹杂个数升高为  $2.12\text{ 个/mm}^2$ . 铸坯中显微夹杂物数量为  $3.23\text{ 个/mm}^2$ ,相对于中间包增加了  $1.1\text{ 个/mm}^2$ ,说明中间包流场分布不均匀,中间包覆盖剂对夹杂物吸附性能较差,同时表明有钢液裸露在空气中被二次氧化或存在保护渣卷渣现象. 根据各工序钢水夹杂物含量参数,可做出钢水夹杂物面积百分比演变图.

从图 3 可以看出,从 LF 进站至 VD 出站,夹杂物面积百分数总体呈逐步下降的趋势. LF 前夹杂物进站夹杂物面积百分比较高为 5.42%;经过 LF 精炼后,大部分夹杂物得到去除,因此夹杂物面积百分比下降明显,降低到 2.76%. 经过 VD 抽真空处理,夹杂物去除明显,降低到 0.75%;但钢水进中间包时,由于二次氧化严重,夹杂物面积百分比升高为 1.11%. 铸坯中显微夹杂面积百分数上升为 1.68%,这是由于中间包覆盖剂对夹杂物吸附性能较差. 从夹杂物数量和面积百分数的变化趋势来看,与全氧的变化趋势基本相同,因此结合降低钢中全氧的操作对提高夹杂物控制水平至关重要.

表 2 为工艺阶段夹杂物的尺寸分布和数量变化. 各工序试样中绝大多数的夹杂物尺寸分布在  $0\sim10\mu\text{m}$  之间. LF 精炼前钢中夹杂物数量多,其中小于  $5\mu\text{m}$  的夹杂物占 71.32%. LF 精炼过程中进行吹氩操

作,由于吹氩过程具有较强的脱出夹杂物的能力,小于 5 μm 的夹杂所占比例进一步升高到 78.43%,夹杂物总去除率为 40.65%,10 μm 以上的大颗粒夹杂比例减少到 2.03%,夹杂物总去除率为 64%. 本阶段处理时间较长,去除夹杂效果明显,各粒度级别夹杂物个数均降低,同时 5 μm 以下夹杂物比例升高,0~10 μm 小尺寸夹杂物去除率相对较低. VD 精炼过程中,夹杂物总去除率为 65.85%,其中小于 5 μm 的夹杂去除率占 62.67%. 各尺寸夹杂物数量都有较大减少,20 μm 以上夹杂物全部去除. 中间包浇注过程中二次氧化严重,钢水中夹杂物数量上升. 中间包钢水显微夹杂粒径较小,0~5 μm 的夹杂物占总数 81.15%,5~10 μm 占总数 17.73%,而大于 10 μm 的夹杂比例很少,仅占 1.12%. 由于中间包流场分布不均匀,中间包覆盖剂对夹杂物吸附性能较差,铸坯中显微夹杂物数量增多,5~10 μm 的夹杂所占比例进一步升高到 22.34%.

表2 50Cr5MoV 各工序钢水中夹杂物粒度分布

炉号	工序	不同粒度夹杂物个数					比例/%			
		0~5 μm	5~10 μm	10~20 μm	>20 μm	总计	0~5 μm	5~10 μm	10~20 μm	>20 μm
平均	LF 进站	470.21	167.60	16.20	3.00	659.25	71.32	25.43	2.45	0.80
	LF 出站	279.07	69.53	10.98	1.25	355.82	78.43	19.54	1.68	0.35
	VD 出站	104.19	16.72	0.79	0	121.51	85.75	13.76	0.49	0
	中间包	138.17	30.18	1.91	0	170.26	81.15	17.73	1.12	0
	铸坯	162.70	47.63	2.88	0	213.20	76.31	22.34	1.35	0

2.2.2 各工序钢中显微夹杂物的类型

1) LF 精炼前显微夹杂物的特征

LF 精炼前所取钢样中观察到的夹杂物主要有以下几类,①大量不规则的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物. ②复合脱氧产物 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - MgO,大部分尺寸都大于 10 μm;由于电炉出钢采用铝粉进行脱氧,钢中夹杂物大部分是颗粒状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂,有明显的棱角,主要以条状和块状出现. 同时发现大型簇串状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物,夹杂物尺寸大于 20 μm. LF 精炼前典型夹杂物的形貌与组成如表 3.

2) LF 精炼后显微夹杂物的特征

LF 精炼结束后的非金属夹杂物主要为:①以 CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> 为主要成分的复合氧化物夹杂;②CaO - MgO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主要成分的复合氧化物夹杂. 这 2 类夹杂物尺寸都小于 10 μm,是由钢包顶渣与钢液相互作用而形成的. ③以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主要成分的非金属夹杂. LF 精炼过程中由于进行脱氧合金化和吹氩操作,小于 5 μm 的夹杂数量急剧下降,大部分 5~10 μm 夹杂物基本去除. LF 处理初期,由于向钢中加入脱氧剂铝球,钢水中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物迅速增多. 当采用 Si - Fe, Mo - Fe, V - Fe 进行微合金化后,钢水中出现了以含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的复合夹杂物,同时条状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂绝大多数转变为块状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂,大部分大型簇串状 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物已经基本去除. 同时为了还原渣中被氧化的铬和降低钢中的氧含量,LF 还原阶段通常采用硅铁进行还原操作. LF 脱硫阶段通过加入石灰和萤石造高碱度还原渣,渣中 CaO 含量相应增多,跟夹杂物中 CaO 含量增多保持一致. 同时由于吹氩搅拌,加入的渣料已经成渣,夹杂物中 MgO, CaO 开始增多,钢中夹杂物大量转变为 CaO - MgO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合夹杂,多为球形或类球形的夹杂物. LF 精炼后典型夹杂物的形貌与组成如表 4.

3) VD 精炼后显微夹杂物的特征

VD 终点钢中非金属夹杂物主要有:①球形或椭球形钙铝酸盐和铬钙酸盐,尺寸 0~10 μm;②条状或三角状的硅酸铁. 在 VD 进行了喂 Si - Ca 线和弱搅拌操作,0~5 μm 夹杂物继续减少,10 μm 以上的大颗粒夹杂基本去除. VD 过程中喂入的 Si - Ca 线使大部分夹杂物变成球形的 mCaO · nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的复合夹杂物,同时含有少量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaS 和 MgS 夹杂物,LF 炉中的 MnS 多呈链状,但喂钙线后大多变为球形的 CaS 或近球形 (Ca, Mn)S,有的与氧化物结合形成复合夹杂物. 钙处理后为确保夹杂物的成分均匀与上浮,必须保证一定的软吹时间. 夹杂物成分更为集中,大部分为球形或类球形 CaO - MgO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合夹杂物. 同时,LF - VD 过程中夹杂物成分的变化,主要与温度降低有关. 钢液中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 的不断析出使得钢中含有一定的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO. 同时,钢液中 Si 会随着温度的降低逐渐析出变成 SiO<sub>2</sub>,使得夹杂物中 SiO<sub>2</sub> 的含

量逐渐升高. VD 精炼后典型夹杂物的形貌与组成如表 5.

4) 中间包钢水中显微夹杂物的特征

中间包中的非金属夹杂物类型与 VD 后的夹杂物类型基本相似, 主要仍然是球形或椭球形钙铝酸盐和铬钙酸盐, 以及条状或三角状硅酸铁, 除此之外还有少量含 Ce 和 La 的夹杂物, 说明中间包覆盖剂和耐材进入钢液中.

5) 铸坯中显微夹杂物的特征

铸坯中的铸坯中的非金属夹杂物主要有: 大部分为以球形钙铝酸盐为主要成分的复合夹杂物, 尺寸小于 10  $\mu\text{m}$ , 是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  用钙处理后的变性产物; 少量硅铝酸钙球状复合夹杂物, 部分夹杂物含 Cr, Mo 元素, 除来源于脱氧产物外, 还可能来源于钢液二次氧化或钢水凝固过程形成的氧化物; 少量含  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaS}$ ,  $\text{SiO}_2$  的复合夹杂物, 来源于耐材侵蚀. 铸坯中典型夹杂物的形貌与组成如表 6.

表 3 LF 精炼之前典型非金属夹杂物形貌与组成

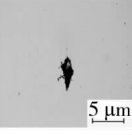
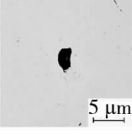
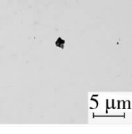
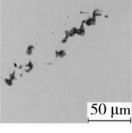
夹杂物形貌	夹杂物组成/%	夹杂物类型
	MgO:2.31	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :89.46	
	MnO:3.78	
	CaO:4.45	
	MgO:26.54	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MgO}$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :42.75	
	$\text{SiO}_2$ :25.47	
	MnO:3.78	
	CaO:1.46	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂
	MgO:5.42	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :85.21	
	MnO:5.98	
	CaO:3.39	簇串状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物
	MgO:1.73	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :85.69	
	$\text{SiO}_2$ :7.35	
	MnO:3.78	
	CaO:1.45	

表 5 VD 精炼后典型非金属夹杂物形貌与组成

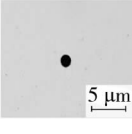
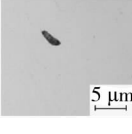
夹杂物形貌	夹杂物组成/%	夹杂物类型
	MgO:17.69	$\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$
	$\text{SiO}_2$ :1.56	
	MnO:3.20	
	CaO:15.29	
	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ :57.74	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :4.53	
	MgO:26.54	$\text{SiO}_2 - \text{FeO} - \text{MgO}$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :9.65	
	$\text{SiO}_2$ :25.47	
	MnO:2.15	
	FeO:35.69	
	CaO:0.50	

表 4 LF 精炼结束后典型非金属夹杂物形貌与组成

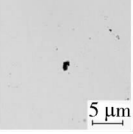
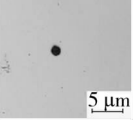
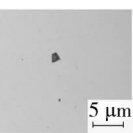
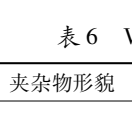
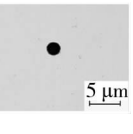
夹杂物形貌	夹杂物组成/%	夹杂物类型
	MgO:5.62	$\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :56.78	
	$\text{SiO}_2$ :17.82	
	MnO:3.20	
	CaO:16.58	$\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$
	MgO:13.62	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :70.35	
	$\text{SiO}_2$ :1.56	
	MnO:3.20	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	CaO:11.29	
	MgO:4.31	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :78.46	
	$\text{SiO}_2$ :1.78	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	MnO:5.20	
	CaO:7.45	
	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ :2.8	

表 6 VD 铸坯典型非金属夹杂物形貌与组成

夹杂物形貌	夹杂物组成/%	夹杂物类型
	MgO:17.52	$\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ :30.46	
	$\text{SiO}_2$ :18.56	
	MnO:3.20	
	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ :8.89	
	CaO:21.37	

3 结论

- 1)严格控制冶炼过程中的氧含量可减轻夹杂物对 50Cr5MoV 锻钢轧辊质量的危害:LF 精炼过程吹氩处理和扩散脱氧效果较好,钢中 T[O] 平均值迅速降低至  $47 \times 10^{-6}$ . VD 真空处理过程中钢中 T[O] 进一步降低. 随着 T[O] 降低,钢中单位面积夹杂物数目和面积百分数均大幅降低.
- 2)LF 精炼具有较强的脱出夹杂物的能力. VD 精炼过程中,夹杂物总去除率进一步升高,其中 20  $\mu\text{m}$  以上夹杂物全部去除. 中间包浇注过程中二次氧化严重,由于中间包流场和温度场分布不均匀,中间覆盖剂去除夹杂物性能较差,铸坯中显微夹杂物数量增多. 轧材中显微夹杂物数量相对于铸坯降低了 1.82 个/ $\text{mm}^2$ .
- 3)LF 进站前,钢水中夹杂物主要是条状和块状的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂和不规则的  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MgO}$  夹杂,同时发现少量大型簇串状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物. LF 精炼后,大量夹杂物为以  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  和  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  为主要成分的复合氧化物夹杂. VD 终点钢中非金属夹杂物主要有球形或椭球形钙铝酸盐和铬钙酸盐,以及具有棱角规则几何形状硅酸铁. 在 VD 进行喂 Si - Ca 线和弱搅拌操作,0 ~ 5  $\mu\text{m}$  夹杂物继续减少,10  $\mu\text{m}$  以上的大颗粒夹杂基本去除. 铸坯中的非金属夹杂物主要有以球形钙铝酸盐为主要成分的复合夹杂物,以及量少硅铝酸钙球状复合夹杂物.
- 4)通过对炼钢过程中各工序的工艺优化,可实现对夹杂物的有效控制. 提高电炉出钢时钢水含量,结合 LF 全程脱氧和合金化,可确保实现 50Cr5MoV 合金铸钢的冶炼.

参考文献:

[1] 岳慎伟,王文焱,袁海伦,等. 50Cr5NiMoV 钢中点状偏析的研究[J]. 热加工工艺,2014,43(8):26 - 29.

[2] 范植金,罗国华,冯文圣,等. 120t 转炉 - LF - VD - CC 流程生产 GCr15 轴承钢的夹杂物[J]. 金属热处理,2011,36(11):37 - 41.

[3] 王建新,陈兴润,潘吉祥. 410S 不锈钢冶炼过程全氧和夹杂物分析[J]. 炼钢,2013,29(3):32 - 35.

[4] 付邦豪,陈超,成国光,等. 430 不锈钢冶炼过程的夹杂物[J]. 钢铁,2012,47(1):40 - 43.

[5] 王爱霞. 钢中非金属夹杂物对显微组织的影响[J]. 宽厚板,2006,12(5):1 - 3.

[6] 李志强,于景坤. 钢中显微夹杂物研究现状与进展[J]. 材料与冶金学报,2011,10(3):159 - 163.

[7] 岳峰,包燕平,崔衡,等. BOF - LF/VD - CC 工艺生产高级船板钢纯净度的研究[J]. 北京科技大学学报,2007,29(增1):1 - 5.

[8] 唐海燕,李京社,杨树峰,等. EAF - LF/VD - CC 工艺生产压力容器钢的洁净度研究[J]. 钢铁,2008,43(1):30 - 32 + 54.

[9] 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.

[10] 张建峰,刘青,罗昭,等. 60Si2Mn 弹簧钢连铸坯夹杂物研究[J]. 连铸,2011(增1):299 - 305.